



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ENERGETICKÝ ÚSTAV

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
ENERGY INSTITUTE

## INTEGRÁLNÍ VZORKOVAČ SEDIMENTŮ INTEGRAL SEDIMENT SAMPLER

DIPLOMOVÁ PRÁCE  
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

Bc. JOSEF ZOUHAR

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

Ing. PAVEL RUDOLF, Ph.D.

BRNO 2009

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Energetický ústav

Akademický rok: 2008/2009

## **ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE**

student(ka): Bc. Josef Zouhar

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Fluidní inženýrství (2301T036)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

### **Integrální vzorkovač sedimentu**

v anglickém jazyce:

#### **Integral sediment sampler**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Integrální vzorkovač je jednoduché zařízení pro sběr sedimentu, které jsou transportovány vodním tokem. Sedimenty jsou následně podrobovány geochemickému rozboru na přítomnost např. toxických sloučenin.

Cíle diplomové práce:

Cílem diplomové práce je rozbor stávajícího provedení vzorkovače a poté jeho zdokonalení na základě analýzy proudění. Pro počáteční studium vzorkovače bude využito výpočtové modelování proudění. Optimalizovaný návrh bude vyroben a odzkoušen na vybrané řece. Experimentální část diplomové práce bude realizována ve spolupráci s Českou geologickou službou.

## **Abstrakt:**

Práce je zaměřena na analýzu proudění v integrálním vzorkovači sedimentu. Analýza proudění je provedena jak pro jednofázové, tak i pro dvoufázové proudění (voda-pevné částice). Výsledky výpočtového modelování jsou porovnány s experimentem, pro jehož účely byl zkonstruován experimentální box. Je uveden popis použitých výpočtových i experimentálních metod a doporučení pro výběr vhodného výpočtového modelu. Konstrukční experimentálního boxu je rovněž uvedeno. Téma práce bylo vybráno ve spolupráci s Českou geologickou službou v rámci projektu MŽP „SP/1b7/156/07“.

## **Klíčová slova:**

Integrální vzorkovač sedimentu, suspendovaný sediment, plavenina, znečištění, výpočtové modelování proudění, experimentální box

## **Abstract:**

This thesis deals with analysis of flow inside integral SPM sampler. Flowing is described for one-phase flow and multi-phase flow (water-solid particles) approaches. Results of computational modeling and experimental modeling are compared. Experimental box was constructed and its construction is noticed. Methods of used computational and experimental modeling are described. Optimal computational model is recommended. The theme of this thesis was chosen in co-operation with Czech Geological Survey within the frame of project MŽP „SP/1b7/156/07“.

## **Key words:**

Integral SPM sampler, suspended sediment, pollution, computational fluid dynamics, experimental box

## **Bibliografická citace mé práce:**

ZOUHAR, J. *Integrovaný vzorkovač sedimentů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 77 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Pavel Rudolf, Ph.D.



## **Prohlášení:**

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, pod vedením vedoucího práce pana ing. Pavla Rudolfa, Ph.D. a s použitím uvedených zdrojů.

Autor:.....

Josef Zouhar

## **Poděkování:**

Za podporu, pomoc, připomínky a rady při zpracování diplomové práce tímto velmi děkuji vedoucímu diplomové práce panu ing. Pavlu Rudolfovi, Ph.D. Panu Mgr. Milanu Geršlovi, Ph. D. a paní Mgr. Evě Franců, Ph. D. z České geologické služby též velmi děkuji za podporu, pomoc a cenné informace.

---

## Obsah:

1. Úvod: .....	8
2. Charakteristika vstupních parametrů .....	8
3. Experimentální část:.....	23
3.1. Požadované parametry experimentálního boxu.....	23
3.2. Varianty řešení experimentálního boxu: .....	24
3.3. Výběr vhodné varianty a její konstrukce .....	44
4. Výpočtové modelování:.....	50
4.1. Matematický popis.....	50
4.2. Výpočtový model .....	53
4.3. CFD výpočet .....	56
5. Zhodnocení výsledků .....	62
6. Závěr .....	72
7. Doporučení pro další výzkum.....	73
8. Seznam použitých zdrojů: .....	74
9. Seznam zkratk .....	76
10. Seznam příloh .....	77

## 1. Úvod:

Voda představuje důležitý prvek při modelaci zemského povrchu. Po dopadu srážek na kontinent se rozdělí na podpovrchovou a povrchovou. Tato terminologie popisuje aktuální pozici vody a vyjadřuje provázanost hydrologického systému a neustálý koloběh vody v přírodě. Řeky v rámci systému představují hlavní transportní médium zvětralého materiálu z kontinentů, který je základem pro půdu a sedimentární horniny. Povrchová voda se prostřednictvím říčního systému dostává do oceánů a její kvalita a vlastnosti jsou ovlivňována jak přírodními tak antropogenními vlivy.

Technologický rozvoj, průmyslová a hlavně chemická výroba mají značný a bohužel vesměs negativní vliv na kvalitu životního prostředí na celé Zemi. Je zřejmé, že povrchové vody nejsou z tohoto působení vyčleněny (**Obr. 1**). Je zřejmé, že povrchové vody nejsou z tohoto působení vyčleněny.

Sledování kvality povrchových vod v rámci ČR je prováděno systematicky řadu let s velmi dobrými výsledky ([www.chmi.cz](http://www.chmi.cz)). Zveřejněné výsledky ukazují na průběžný pokles koncentrací sledovaných škodlivin na většině a odráží tak zájem společnosti o kvalitu životního prostředí. Přes tyto pozitivní výsledky stále existuje řada otevřených otázek na které je potřebné hledat odpovědi ([www.recetox.cz](http://www.recetox.cz)). Jedním aspektem je otázka kolik materiálu a jaké kvality je přenášeno vodním tokem.



**Obr. 1** – Chemický odpad vypouštěný do řeky [1]

## 2. Charakteristika vstupních parametrů

*Kapitola byla zpracována na základě informací ze zdrojů [15] [20] [21] [22] [23] [24] [25] [26]*

### 2.1. Řeka jako sedimentační prostředí

Po milióny let představuje říční systém (fluviální prostředí) důležitý prvek z hlediska stavby krajiny pro svou schopnost transportovat a následně ukládat materiál z kontinentů. Říční systém je definován různým způsobem ale určující prvky jsou říční koryto a záplavová plošina.

Řeky jsou klasifikovány na základě tvaru koryta, který je podmíněn rychlostí toku a může se během času měnit. Tvar říčního koryta a rychlost toku následně ovlivňuje množství materiálu, který je unášen nebo naopak sedimentován a je odvislé od klimatu, topografie a druhu vegetace v nejbližším okolí toku.

Sediment v rámci řeky je přenášen na několikrát tzn. způsobem transport a následné uložení. Doba transportu se liší od řeky a materiálu a pohybuje se řádově v rozmezí 1 až  $10^4$  let (viz [21]). Mezi nejdůležitější faktory ovlivňující rychlost a průběh přenosu sedimentů patří klimatická sezóna, dynamika vlastního toku, hloubka vody, tvar dna, zrnitost a textura přenášeného materiálu.

## 2.2. Vodohospodářské úpravy toků

Úpravy toků se rozumí souhrn prací, pomocí kterých se mění přirozený režim toků. Účelem prováděných úprav toků bývá: zabránit záplavám za povodní, odplavování břehů a ornice, zanášení odplavených hmot do tratí, kde by způsobily zmenšení průtočnosti, nanášení sterilních zemin na úrodné pozemky, zbahňování půdy, podkalování pícin, odnášení a ničení úrody, poškozování staveb. Úpravami toků bývá dále dosaženo snížení nebo zvýšení hladiny vody v řece a s ní související hladiny podzemních vod pro účely zemědělství a zásobení vodou, získat nové plochy pozemků pro zemědělství, průmysl apod. případně dosaženo zlepšení plavebních poměrů a vzhledu krajiny. Všechny antropogenní zásahy vedou ke změně hydrologických poměrů a změně režimu usazování přenášených sedimentů např. hromadění nadměrného množství sedimentů v přehradních nádržích.

## 2.3. Charakter přenášeného materiálu

Složení sedimentů, které se akumulují v jednotlivých částech říčního systému odráží tři hlavní faktory:

- zdroj transportovaného materiálu
- proces transportu a uložení
- chemické změny během transportu vodním sloupcem

V říčním sedimentu jsou různou měrou zastoupeny tři základní složky a to detritický materiál, biogenní případně organický podíl a antropogenní částice a sloučeniny. Detritický podíl představují běžné horninotvorné minerály jako je křemen, živce, které se do fluválního systému dostávají zvětráváním příbřežních sedimentů a hornin. Biogenní a organické látky jsou tvořeny materiálem přirozeného původu a to rostlinnými zbytky nebo schránky organismů. Antropogenní materiál představuje pestrou paletou od zbytků ze stavebnictví, průmyslu přes zbytky po pálení po chemické látky tzv. kontaminanty. Kontaminant je v tomto smyslu chápán jako látka, která vstupuje do prostředí bez toho že je známo její působení a účinky v prostředí. Mezi kontaminanty patří **polutanty** což jsou látky která způsobují poškození životního prostředí (viz zdroj [22])

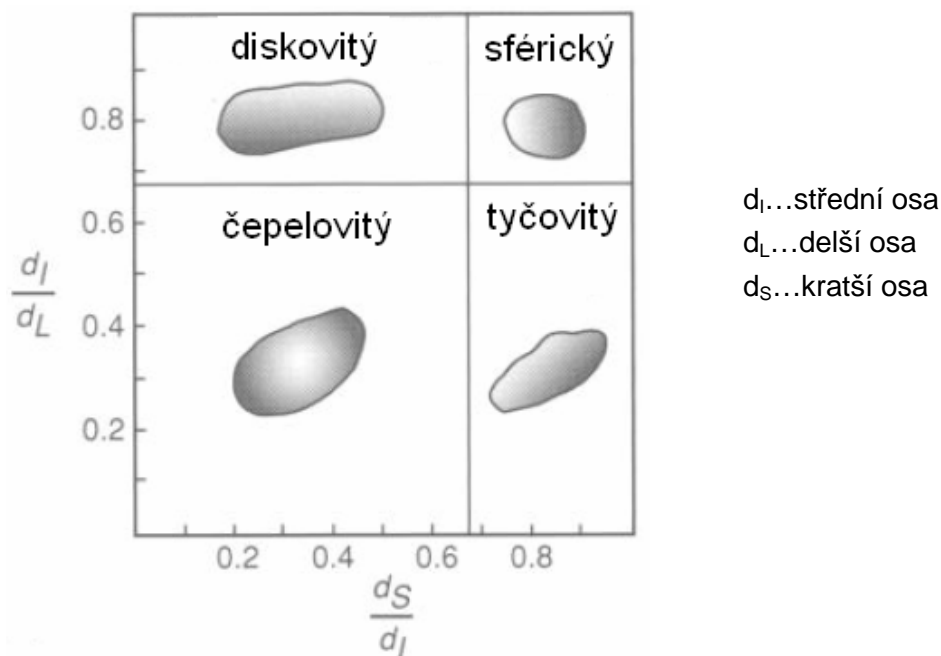
**Klasifikace částic:**

Bez ohledu na původ jsou částice které se vyskytují v říčním toku klasifikovány podle velikosti a tvaru. Velikost transportované částice je důležitý parametr nejen z pohledu popisného, ale také pro správné chápání způsobu jakým je daná částice transportována. Pro větší částice se jejich velikost měří jako průměr, pro menší částice se stanovuje podle velikostí oka na síť. Existuje řada klasifikací ale nejčastěji je používána Udden-Wentworth (**Tab. 1**)

Název	Velikost v mm
Bloky	128-64
Oblázky	64 - 4.0
Štěrk	4.0-2.0
Písek	2.0-0.63
Prach	0.63-0.002
Jíl	pod 0.02

**Tab. 1** - Klasifikace částic podle velikosti (Udden-Wentworth schéma)

Tvar částice je více komplexní a obsahuje prvky jako je textura a zaoblenost. Stupeň zaoblenosti je určen na základě vizuálního porovnání s grafem (**Obr. 2**). Rozlišují se čtyři základní tvary a to diskovité, sférické, tyčovitě a čepelovitě (viz [15])



**Obr. 2** – Graf stupně zaoblenosti  
[15]

## 2.4. Transport materiálu fluvialním systémem

Transport a ukládání sedimentu v rámci říčního toku se řídí vztahem mezi rychlostí fluida a velikostí transportované částice. Velmi zjednodušeně se dá říci, že částice dané velikosti začne sedimentovat v okamžiku, kdy dojde k poklesu rychlosti.

Druh proudění fluida se určuje na základě Reynoldsova čísla ( $Re$ ) a může být laminární nebo turbulentní (**Obr. 3** a **Obr. 4**).

Reynoldsovo číslo vyjadřuje poměr konvektivní složky setrvačné síly a třecí síly a je dáno následující rovnicí:

$$Re = \frac{F_s}{F_t} = \frac{\rho \cdot l^2 \cdot v^2}{\eta \cdot l \cdot v} = \frac{v \cdot l}{\nu} \quad (1)$$

Kde:

- $v$  je rychlost proudění [m/s]
- $l$  je charakteristický rozměr (průměr) [m]
- $\nu$  je kinematická viskozita kapaliny [m<sup>2</sup>/s]

$$\text{nebo } Re = \frac{v_c \cdot d \cdot \rho_c}{\eta} \quad (2)$$

Kde:

- $v_c$  je rychlost částice [m/s]
- $d$  je průměr částice [m]
- $\rho_c$  je hustota částic [kg/m<sup>3</sup>]
- $\eta$  je dynamická viskozita kapaliny [Pa.s]

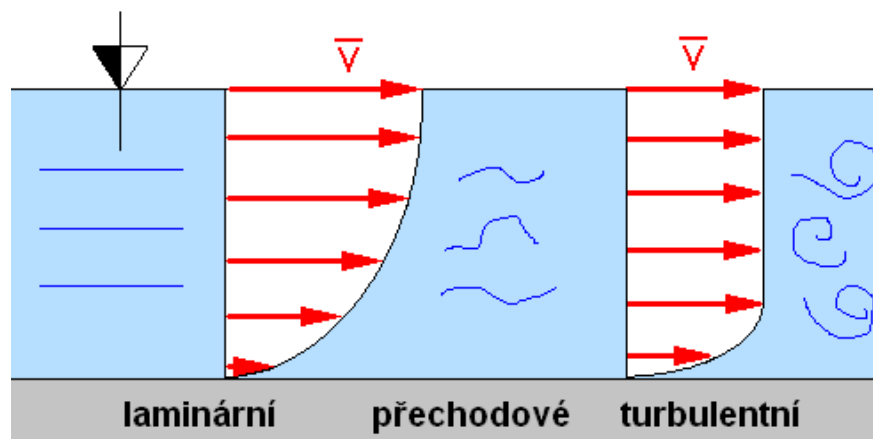
turbulentní  
proudění

laminární  
proudění

**Obr. 3** – Příklad laminárního a turbulentního proudění [16]

Kritická hodnota Reynoldsova čísla  $Re_{kr}$  je 2320 a je-li:

- $Re < Re_{kr}$  - proudění je laminární
- $Re > Re_{kr}$  - proudění je turbulentní
- $Re \approx Re_{kr}$  - přechodové proudění



**Obr. 4** – Rychlostní profily (závislost velikosti rychlosti na vzdálenosti od hladiny) laminárního a turbulentního proudění

Laminární proudění se vyskytuje méně často a to zejména tam, kde jsou velmi nízké rychlosti proudění nebo tenké spáry (např. stékání po svislé stěně, proudění krve v žilách atd.) V přírodě v převážné většině převládají děje turbulentní (**Obr. 5**).

Turbulence je jedním z nejméně probádaných fyzikálních jevů, je specifická pro svou vířivost, nahodilost, chaotické chování, difuzivitu, spojitost, a trojrozměrnost.

Turbulentní proudění je produktem nestability laminárního proudění. Nestabilita (zejména zvýšení rychlosti) způsobuje neuspořádaný pohyb svazků molekul kapaliny. Situace vede ke vzniku vírů různých velikostí v nichž se akumuluje energie. Vzniká energetická kaskáda, což je jev, při kterém velké víry předávají svou energii menším vírům, které ji následně předávají ještě menším vírům atd.



**Obr. 5** – Turbulentní proudění na řece Fox River [10]

Akumulace energie a vířivý pohyb vede k větší disipativitě (ztrátovosti), než u laminárního proudění. Nahodilost a chaotické chování vírů ale způsobuje obtížné modelování a matematické vyjádření turbulentních jevů stejně tak jako fakt, že velikost vírů je velice různorodá od 0,1mm až po několik desítek centimetrů. Avšak právě vlivem vírů dosahuje turbulentní proudění větší difuzivity, která je velmi významná pro přenos hybnosti, energie a hmoty.

Přenos hmoty v kapalině závisí také na hodnotě Froudeova čísla ( $Fr$ ), které je dáno poměrem setrvačné síly a tíhové síly působící na částici:

$$Fr = \frac{F_s}{F_t} = \frac{\rho \cdot l^2 \cdot v^2}{\rho \cdot g \cdot l^3} = \frac{v^2}{g \cdot l} \quad (3)$$

Kde:

$v$  je rychlost proudění [m/s]

$g$  je tíhové zrychlení [ $m/s^2$ ]

$l$  je charakteristický rozměr (hloubka) [m]

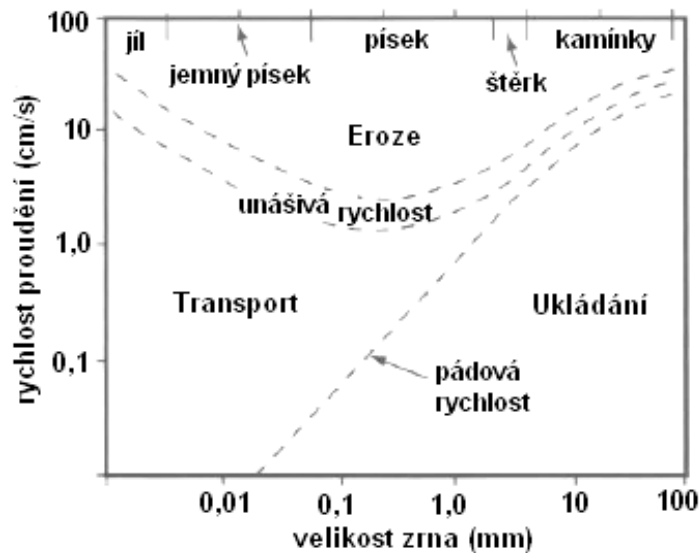
Je-li:

$Fr < 1$  je setrvačná síla menší, než tíhová. Částice v kapalině mají tendenci klesat ke dnu.

$Fr > 1$  je setrvačná síla větší, než tíhová. Částice jsou unášeny proudem kapaliny.



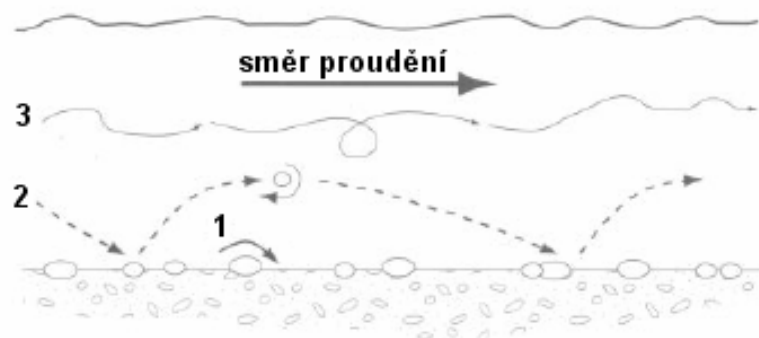
Chování částice v kapalině tedy závisí na rychlosti proudění a velikosti částice. Vztah mezi těmito dvěma veličinami popisuje Hjulströmův diagram (**Obr. 6**), který určuje zda pro danou velikost částice a rychlosti proudění bude docházet k erozi, transportu v kapalině nebo k ukládání (sedimentaci).



**Obr. 6** – Hjulströmův diagram  
[16]

Pohyb sedimentu ve fluvialním systému (**Obr. 7**) se popisuje jako:

1. rolování - materiál je příliš těžký, pohybuje u dna
2. saltace – částice je vymrštěna a následně klesá ke dnu a proces se opakuje
3. v suspenzi - částice jsou drženy trvale ve vznosu



**Obr. 7** – Pohyb částice v kapalině  
[15]

Zvyšování rychlosti proudění může vést ke změně pohybu z rolování (1) na saltaci (2) i na pohyb v suspenzi (3).

Částice samozřejmě mohou být vystaveny řadě dalších vlivů ovlivňujících jejich chování v kapalině. Pro velmi malé částice ( $< 1 \mu\text{m}$ ) může být významné působení např. Saffmannovy vztahové síly nebo vlivem Brownova pohybu (viz zdroj [7])

## 2.5. Říční sedimenty jako lapače kontaminací

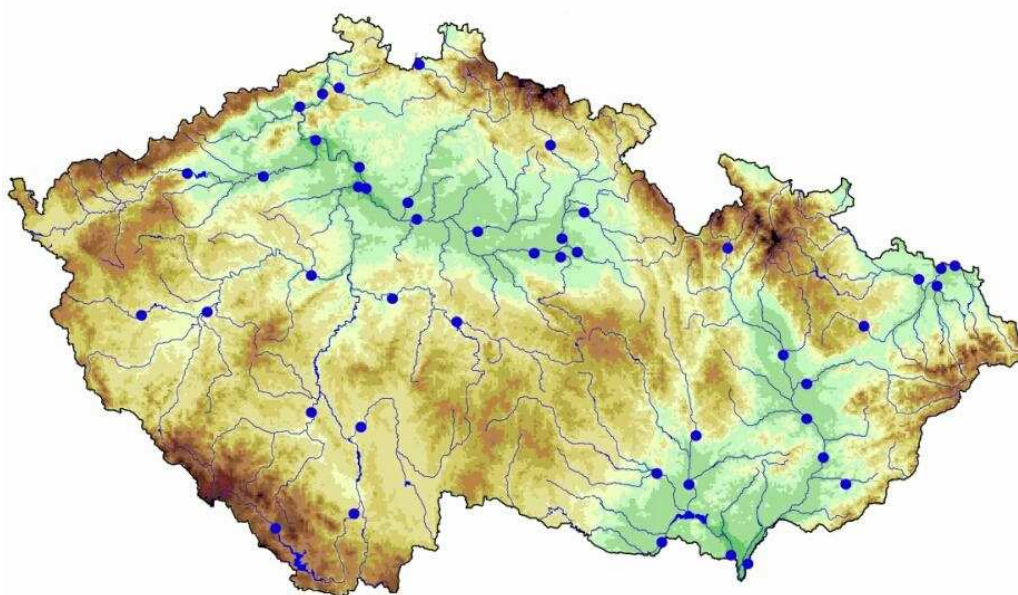
Řeky mohou být kontaminovány různou měrou těžkými kovy, nutrienty, organickými látkami, radionuklidy, které se do toku dostávají z bodových zdrojů, atmosférickým spadem, popřípadě plošným splachem. Mechanismy transportu, ukládání a remobilizace sedimentů a na ně vázaných kontaminantů byly důkladně zkoumány především v oblastech postižených důlní činností, které jsou následně ovlivněny kyselými důlními vodami. V tomto prostředí je množství transportovaných kovů mnohonásobně zvýšené vlivem nízkého pH (viz [23]). Způsob šíření a následné jevy probíhající u kyselých důlních vod lze obecně aplikovat i na ostatní prvky a sloučeniny a celý fluviální systém.

Forma v jaké je kontaminant transportován (rozpuštěný nebo vázaný) závisí na fyzikálních a chemických faktorech. Chemické faktory zahrnují např. obsah organické hmoty, množství a podobu Fe-Mn oxihydroxidů, salinitu, pH a redoxní potenciál (viz [24]). K fyzikálním faktorům patří textura sedimentu, geomorfologie krajiny, rychlost toku, klimatická sezóna.

Jakmile sediment s vázaným kontaminantem vstoupí do říčního systému tak dochází k jeho transportu a následnému uložení směrem po toku řeky. Sedimenty a na ně vázané kontaminaty jsou vázány na záplavové plošiny a v těch mohou setrvat řádově stovky let (viz [25]).

## 2.6. Metody pro získání vzorku plaveniny

Komplexní vzorkování a sledování jakosti povrchových toků [11] je prováděno od roku 1963 na vybraných profilech českých řek (**Obr. 8**) pod záštitou Ministerstva životního prostředí České republiky a odběry vzorků jsou prováděny pracovníky Českého hydrometeorologického ústavu (ČHMÚ).



**Obr. 8** – Zobrazení odběrových míst při komplexním sledování jakosti vod ČR [11]

V současné době je na významných tocích v rámci území České republiky rovnoměrně rozmístěno 257 profilů, ve kterých se 12x ročně odebírají vzorky vody pro analýzy základních fyzikálně-chemických parametrů, těžkých kovů, specifických organických sloučenin, biologických a mikrobiologických ukazatelů (viz [27]).

Ve státní síti je začleněno 44 profilů komplexního monitoringu jakosti vody, kde jsou sledovány jednotlivé polutanty ve vodě, plaveninách, sedimentech a biomase. Automatické analyzátorové stanice pro kontinuální sledování jakosti vody v tocích jsou na 8 profilech.

### **Voda**

Voda je obvykle vzorkována bodovým odběrem v pravidelných časových intervalech do vhodných vzorkovnic (lahví).

### **Říční sediment**

Říční, resp. dnový sediment je obvykle vzorkován vhodným vzorkovačem, jako je hrabák, drapák nebo speciální vrták jako bodový odběr v pravidelných časových intervalech.

### **Suspendovaná hmota**

Metody odběru vzorků suspendované hmoty lze rozdělit na dvě skupiny, vzorkování nespojitě a spojitě. Nespojitě vzorkování je reprezentováno nabíráním vzorku vody se suspendovanou hmotou do odběrné nádoby nebo krátkodobé odstředivky. Nevýhodou těchto metod je zachycení jen velmi malého, téměř nepatrného množství hmoty protékající s časem. Druhou možností je vzorkování časově spojitě, při němž je vzorek odbírán po delší časový úsek.

Materiál transportovaný řekou ve formě plaveniny je možné posuzovat dvěma způsoby:

- **Kvantitativně** – zahrnuje sledování množství materiálu odnášeného řekou, tzn. koncentraci plavenin připadající na jednotku objemu vody a průtok plavenin za jednotku času.
- **Kvalitativně** – zahrnuje posuzování plaveniny z hlediska jejího složení a obsahu nebezpečných látek.

Pro korektní určení obsahu látky v plavenině a pro správné posouzení jejího vlivu na říční ekosystém je třeba vzít v úvahu a zajistit:

**a) Výběr lokality pro odběr:**

Lokalita, v níž je prováděn odběr vzorku plaveniny musí být pro dané území charakteristická, jelikož vzorek by měl být pro lokalitu co nejtypičtější (např. vzorkovat v dostatečné vzdálenosti od jezu, kde je již proudění ustálené, neodebírat vzorky přímo u zdroje znečištění, atd.). Lokalita musí být v rozumné míře dostupná technice pro odběr a odvoz vzorků a nejlépe však nepřístupná jiným osobám, aby nedošlo ke znehodnocení oděru či ke zničení odběrových zařízení – **Obr. 9 a Obr. 10.**



**Obr. 9** – Odběrové místo – profil Svratka, lokalita Vranovice

**b) Odebrání dostatečného množství vzorku:**

Ačkoli je detekce nebezpečných látek v plavenině snazší než detekce nebezpečných látek ve vodě, je hmotností podíl plaveniny ve vzorku vody malý. Proto je třeba odebrat takové množství vzorku, aby bylo možné rozbořením přítomnost některých nebezpečných látek prokázat (viz [20]). Jejich obsah ve vzorku totiž může být pod mezí stanovitelnosti, avšak v celkovém množství plaveniny může být, z hlediska ekologické zátěže krajiny, podstatný.



**Obr. 10** – Odběrové místo – profil Svratka, lokalita Rajhrad



Lze použít následující metody odběru vzorku:

### Ruční odběr do odběrných nádob:

- velice jednoduchá metoda, kdy je vzorek plaveniny nebo sedimentu ze dna odebrán přímo do ruční odběrné nádoby (**Obr. 11**), hermeticky uzavřen a dopraven do laboratoře. Používá se např. při denním vzorkování při průběhu povodňové vlny nebo vždy když je potřeba rychle a jednoduše provést odběr.



**Obr. 11** – Ruční odběrná nádoba  
[11]

### Automatické vzorkovací zařízení:

- umožňuje provádět odběry v předem zvolených časových intervalech. Díky tomu je možné ve vzorcích postihnout možné výkyvy v koncentraci plavenin v průběhu určitého časového horizontu. Sací hadice je umístěna do toku a zařízení (**Obr. 12**) dle naprogramovaného režimu vždy provede načerpání vzorkované vody do nádobky v zásobníku (viz **Obr. 13**). Některá zařízení umožňují flexibilní změnu režimu čerpání dle aktuálních podmínek na řece (zvýšený zákal, vyšší průtoky atd.)



**Obr. 12** – Automatické vzorkovací zařízení  
[11]



**Obr. 13** – Detail zásobníku pro ukládání vzorků  
[11]

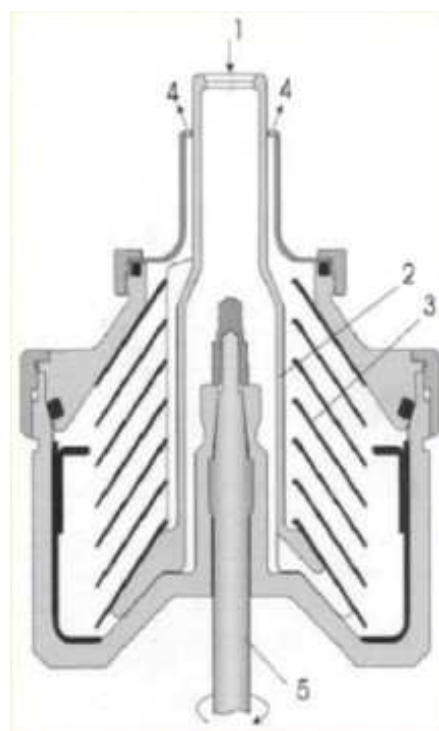
### Odstředivka Alfa Laval:

- Terénní vozidlo je vybaveno odstředivacím zařízením (**Obr. 14**), které umožňuje odebrání většího množství vzorku. Zařízení funguje tak, že vozidlo přijede do blízkosti toku. Sací hadice je pomocí plovákových bójek ustavena v určité hloubce pod hladinou a dochází k čerpání. „Kapalina společně s plaveninou protéká středem distributoru 2, putuje vzhůru a protéká meziprostory mezi talíři 3, kde jsou plaveniny separovány z kapaliny působením odstředivé síly. Odstředěná pevná fáze se pohybuje po spodní straně disků k okraji bubínku kde se shromažďuje na stěnách bubínku. Vyčištěná kapalina odtéká otvorem 4.“ viz (**Obr. 15**) [cit. 28.4. 2009] zdroj [12]



**Obr. 14** – Odstředivka instalovaná ve voze  
*Land-Rover Defender*  
[12]

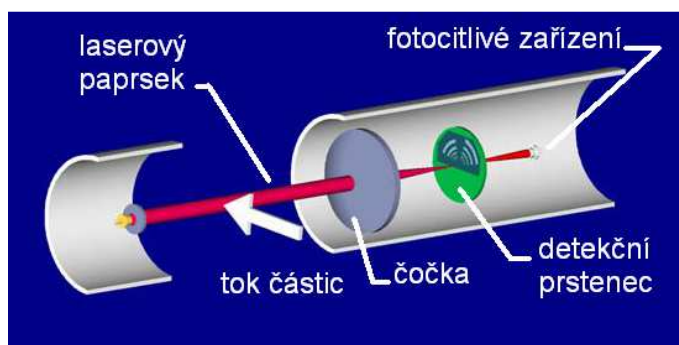
Odběry vzorků pomocí odstředivky probíhají od roku 2001. Výhodou je vysoká mobilita zařízení a již zmíněná schopnost zachytit velké množství plaveniny, nevýhodou je naopak cena zařízení (několik milionů) a s tím související malý počet vozidel, které jsou v ČR k dispozici.



**Obr. 15** – Schématický řez  
Odstředivkou Alfa-Laval  
[12]

### LISST-SL:

- Z angl. Laser In Situ Scattering Transmissometer-StreamLined. Poměrně nová metoda laserového měření koncentrace, velikosti částic, rozptylu a rychlosti proudění suspendovaném sedimentu. Měřicí zařízení (schéma na **Obr. 16**) je umístěno do říčního toku, voda prochází přes laserový paprsek. Průchod částic narušuje paprsek, který je pomocí čočky nasměrován na detekční prstenec (umožňuje rozpoznání až 32 velikostí částic) a fotocitlivé zařízení. Zde dochází k převodu impulsů světla na elektrické impulsy, které jsou počítačem vyhodnoceny (jedná se v podstatě o LDA metodu).



**Obr. 16** – Schematické znázornění konstrukčního řešení  
laseru LISST-ST  
[6]

Konstrukce zařízení je použitelná pouze pro kvantitativní vyhodnocení. Přítomnost škodlivých ani jiných látek není možné prokázat. Výhodou je, že měření probíhá v reálném čase a v původním prostředí.

### **Integrální vzorkovač sedimentu (IVS):**

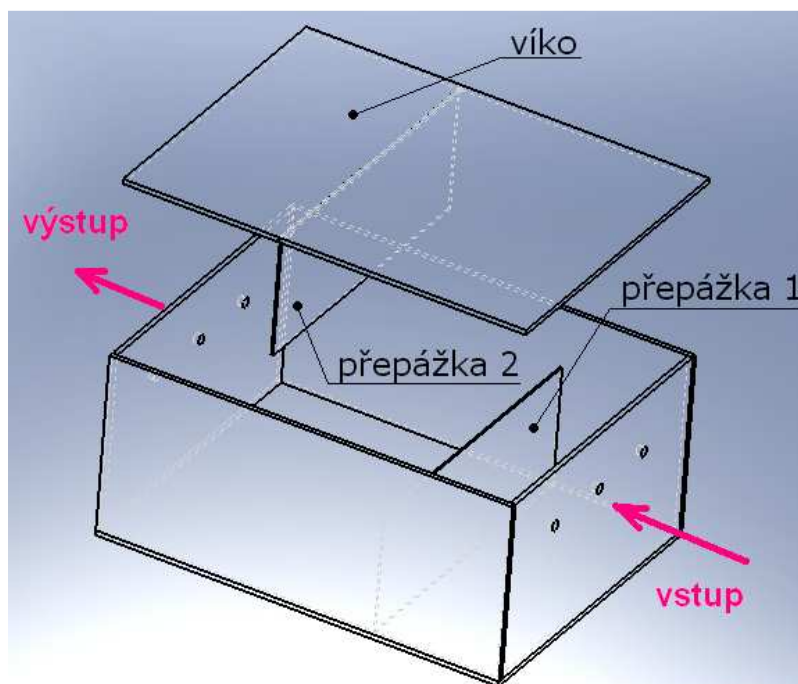
- umožňuje provádět kontinuální odběr vzorku v průběhu určitého časového období – většinou 1 měsíc. Ve vzorku jsou tedy zachyceny i špičky zvýšení obsahu polutantů (způsobené např. náhlou kontaminací toku), které by jednorázovým odběrem nemusely být vůbec zaznamenány.

V následující kapitole bude uvedena charakteristika zařízení IVS jakožto témata této práce.

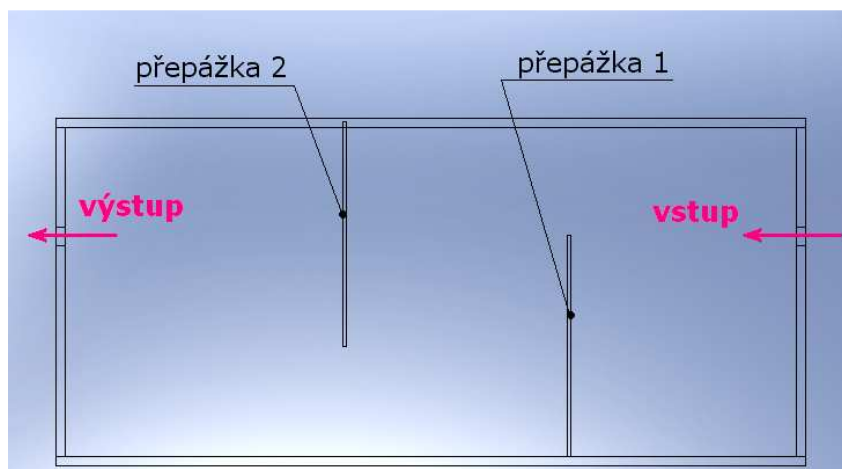
### **Integrální vzorkovač sedimentu (IVS):**

Integrální vzorkovač sedimentu je v podstatě krabice (**Obr. 15**) s rozměry 400 mm × 300 mm × 250 mm (délka × šířka × výška) vyrobená z nerezového plechu o tloušťce 1,5 mm a umístěná do vzorkované řeky. Zařízení je opatřeno na vstupní a výstupní straně otvory, kterými vtéká, resp. vytéká kapalina. Rozměry i počet otvorů jsou různé v závislosti na typu vzorkovače.

Uvnitř zařízení jsou v celé šířce umístěny přepážky, které v prostoru krabice tvoří jednoduchý labyrint (**Obr. 16**).



**Obr. 17** – Základní uspořádání IVS



**Obr. 18** – Vnitřní řešení IVS – pohled z boku

Hlavním smyslem tohoto řešení je, že po vstupu vody do vzorkovače skrz malé otvory dojde vlivem náhlého rozšíření ke zpomalení rychlosti proudění. Přepážky ve vzorkovači tvoří zpomalenému proudu bariéry a podporují vznik vírů. Všechny tyto jevy mají umožnit sedimentaci částicím, které by se za normálních podmínek v řece neusadily.

Sedimenty se shromažďují na dně vzorkovače, kde tvoří souvislou vrstvu. Po uplynutí doby vzorkování je zařízení vyzvednuto z řечиště, sedimenty jsou umístěny do dezinfikovaných nádob a dopraveny do laboratoře.

Výhodou je skutečnost, že k provozu není zapotřebí elektrické energie, vzorkovač pracuje samostatně a má velmi jednoduchou konstrukci. Hlavní nevýhodou je současná nemožnost určit množství a charakter sedimentu, který IVS opouští aniž by se usadil. K popisu jevů, které ve vzorkovači probíhají má přispět i tato práce.



Na **Obr. 19** jsou zobrazeny některé modifikace vzorkovače používané v ČR. Příprava vzorkovače před instalací do říčního koryta je vidět na **Obr. 20**. Víko vzorkovače je s jeho tělem pevně spojeno čtyřmi šrouby. Šrouby také upevňují čtyři nerezová oka, skrz která je protaženo ocelové lanko, pomocí něhož je celé zařízení ukotveno ke břehu.



**Obr. 19** – Možná řešení IVS.

*Ve vzorkovači v popředí jsou, mezi přepážkou, patrné dvě misky pro sediment vybavené úchopy pro snadné vyjmutí.*



**Obr. 20** – IVS před instalací do koryta řeky

Vzorkovač je umístěn do toku, tak aby stěna se vstupními otvory byla kolmá na směr proudění v řece a celé zařízení bylo ponořeno asi 200 – 500 mm po hladinou. Umístění hlouběji může znehodnocovat měření, jelikož nemusí dojít k zachycení nejmenějších částic (viz kapitola 2.1).

V případě, že se jedná o vzorkování řeky, jejíž šířka v hladině je značná nebo není možné z jiných důvodů IVS umístit u břehu, lze IVS připevnit např. k bójí (**Obr. 21**).

Odběr získaných vzorků (**Obr. 22**) probíhá do nádob ošetřených kyselinou dusičnou a vybavených hermetickým uzávěrem.



**Obr. 21** – Vyzvedávání IVS umístěného pod bójí v Hamburgu na řece Labi

[13]



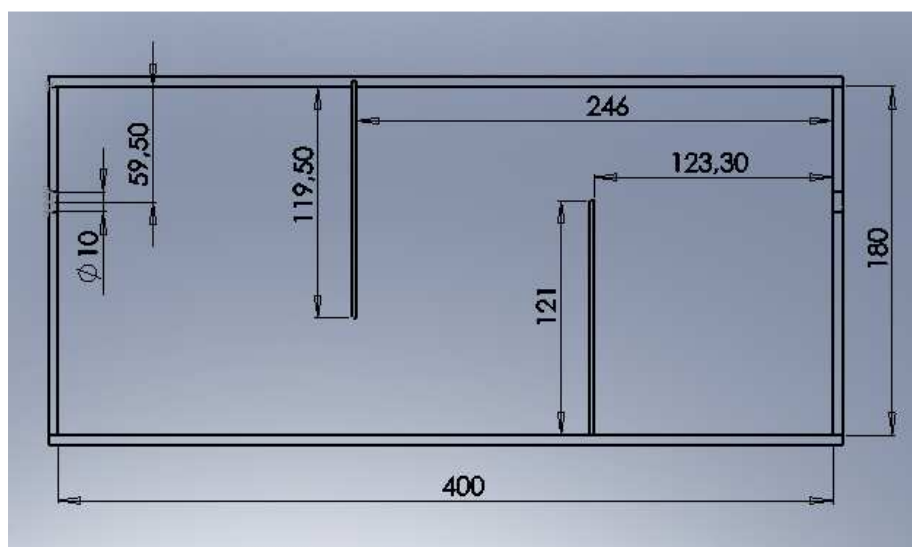
**Obr. 22** – Odebírání vzorků sedimentu

**Konstrukční řešení integrálního vzorkovače sedimentu:**

Veškeré činnosti spojené s rozbořem jevů ve vzorkovači byly prováděny na následujícím typu IVS (**Obr. 23**):

*Pozn.: Jedná se o typ vzorkovače s modifikovanou výškou, která je vhodnější zejména při přepravě a manipulaci se vzorkovačem.*

- Rozměry: 400 mm × 300 mm × 180 mm (délka × šířka × výška)  
(Jedná se o rozměry vnitřního prostoru vzorkovače)
- 3× vstupní a 3× výstupní otvory se vzájemnou roztečí 75 mm, všechny o průměru 10 mm, jejichž osa je ve vzdálenosti 59,5 mm od horní hrany vzorkovače
- výška přepážky 1 je 121 mm ve vzdálenosti 123,3 mm od čelní stěny
- výška přepážky 2 je 119,5 mm ve vzdálenosti 246 mm od čelní stěny



**Obr. 23** – Základní rozměry IVS. Pohled z boku. Šířka IVS je 300 mm

- přepážka 1 je konstruována tak, že její horní hrana je téměř ve stejné výšce jako osa vstupních otvorů. Pravděpodobně se však nejedná o úmysl, ale o shodu okolností vyplývajících z výroby. V jiných modifikacích nebyla tato skutečnost zaznamenána
- Při modelování jevů probíhajících ve vzorkovači je důležité zachovat stejný vnitřní prostor jako ve skutečném vzorkovači, proto jsou rozměrové kóty vztaženy k vnitřním stěnám IVS

### 3. Experimentální část:

Ve spolupráci s Českou geologickou službou bylo rozhodnuto o dodatečném cíli této práce v podobě vytvoření experimentálního boxu. Box by umožňoval simulaci a sledování jevů, které nastanou po vstupu kapaliny do vzorkovače, za podobných podmínek jako ve skutečnosti a umožňoval by ověření funkčnosti nových verzí IVS.

#### 3.1. Požadované parametry experimentálního boxu

Experimentální řešení má přispět k pochopení jevů a mechanismů usazování, které ve vzorkovači probíhají a k potvrzení, popř. vyvrácení předpokladů spojených se smyslem vlastního řešení IVS. Některé výsledky experimentálního řešení budou také použity pro správné nastavení výpočetního modelu.

##### Předpoklady chování kapaliny uvnitř IVS:

- 4.1. výrazný pokles rychlosti proudění
- 4.2. vznik vírů různých velikostí (po vstupu do IVS, při proudění přes jednotlivé přepážky, při kontaktu kapaliny se stěnami (např. v rozích))
- 4.3. jevy se budou vzájemně ovlivňovat a usazování částic ve vzorkovači bude závislé nejen na velikosti částic suspendovaných v kapalině, ale také právě na těchto turbulentních jevech.

Experimentální řešení by mělo přinést objasnění následujících problémů:

- určení velikostí částic
  - s největší tendencí se usazovat
  - usazujících se nezávisle na jevech v IVS
  - opouštějících IVS aniž by se usadily
- chování částic při kontaktu se stěnou a po usazení na dně IVS

Ve zdroji [7] jsou uvedeny rozsahy rychlosti proudění na vstupu do vzorkovače. Parametry experimentálního zařízení by měly být nastaveny tak, aby byly tyto hodnoty dodrženy.

Současně s tím bylo třeba při konstrukci zohlednit i další skutečnosti ovlivňující konečnou podobu zařízení:

- **Rychlosti proudění na vstupu do IVS  $v = 0,19$  až  $0,27$  m/s** - byly získány výpočtovým modelováním pro rychlosti proudění v řece  $v = 0,25$  až  $0,5$  m/s [zdroj 7]
- **Jednoduchost konstrukce** – usnadňuje a zlevňuje výrobu a minimalizuje riziko poruchy

- **Možnost změny rozměrů vzorkovače** – důležitá z hlediska optimalizace rozměrů IVS
- **Možnost sledování základní veličiny – průtoku** – tzn. vybavení okruhu průtokoměrem. Ze znalosti průřezu potrubí tak bude možné určit vstupní rychlosti do IVS
- **Možnost sledování proudění uvnitř IVS** – jelikož posuzování jevů bude probíhat pouze vizuálně, je třeba experimentální box se vzorkovačem konstruovat z transparentních materiálů
- **Cena**

Na základě uvedených parametrů bylo vytvořeno několik variant návrhů experimentálního boxu. Společným principem všech variant je, že suspendovaný sediment je **nahrazen pískem o známé zrnitosti**, která je přibližně stejná jako velikost částic vyskytujících se v suspendovaném sedimentu v běžných podmínkách (viz kapitola 2.1). Ze zprávy [7] vyplývá průměrná uvažovaná koncentrace pevné fáze v kapalině o hodnotě **50 mg/kg**. Pro potřeby experimentu se počítá s vytvořením suspenze s **koncentrací vyšší**, než je uvedeno s předpokladem, že požadované koncentrace bude dosaženo při smísení s proudem čisté vody urychleným na rychlost odpovídající rychlosti v řece. Tím by měly být zajištěny podmínky odpovídající reálné situaci.

### 3.2. Varianty řešení experimentálního boxu:

#### 1. Gravitační:

Varianta využívá gravitace pro zajištění potřebné rychlosti před vzorkovačem. Rychlost proudění kapaliny je dána její energií, kterou popisuje Bernoulliho rovnice<sup>1</sup>:

Bernoulliho rovnice mezi místy 1 a 2 na proudnici v kapalině:

$$\frac{p_1}{\rho} + \frac{\alpha_1 \cdot v_1^2}{2} + g \cdot h_1 = \frac{p_2}{\rho} + \frac{\alpha_2 \cdot v_2^2}{2} + g \cdot h_2 + Y_{z1,2} \quad (4)$$

kde:

$\rho$	je hustota kapaliny [kg/m <sup>3</sup> ]
$p_1, p_2$	je celkový tlak v místě 1 resp. 2 [Pa]
$\alpha_1, \alpha_2$	je Coriolisovo číslo <sup>2</sup> . Pro běžné výpočty $\alpha = 1$ [-]

<sup>1</sup> Bernoulliho rovnice vyjadřuje celkovou energetickou bilanci jednoho kilogramu tekutiny mezi dvěma body ležícími na proudnici v tekutině. Uvedený tvar je používán nejčastěji pro běžné technické výpočty. Úplný tvar rovnice lze najít ve zdroji [14]

<sup>2</sup> Vyjadřuje poměr mezi kinetickou energií skutečného rychlostního profilu vůči kinetické energii pístového (tj. ideálního) rychlostního profilu.

$v_1, v_2$	je velikost absolutní rychlosti v místě 1 resp. 2 [m/s]
$h_1, h_2$	je výška bodu 1 resp. 2 od zvolené nulové hladiny [m]
$Y_{z1,2}$	je ztrátová energie mezi body 1 a 2 [J/kg]

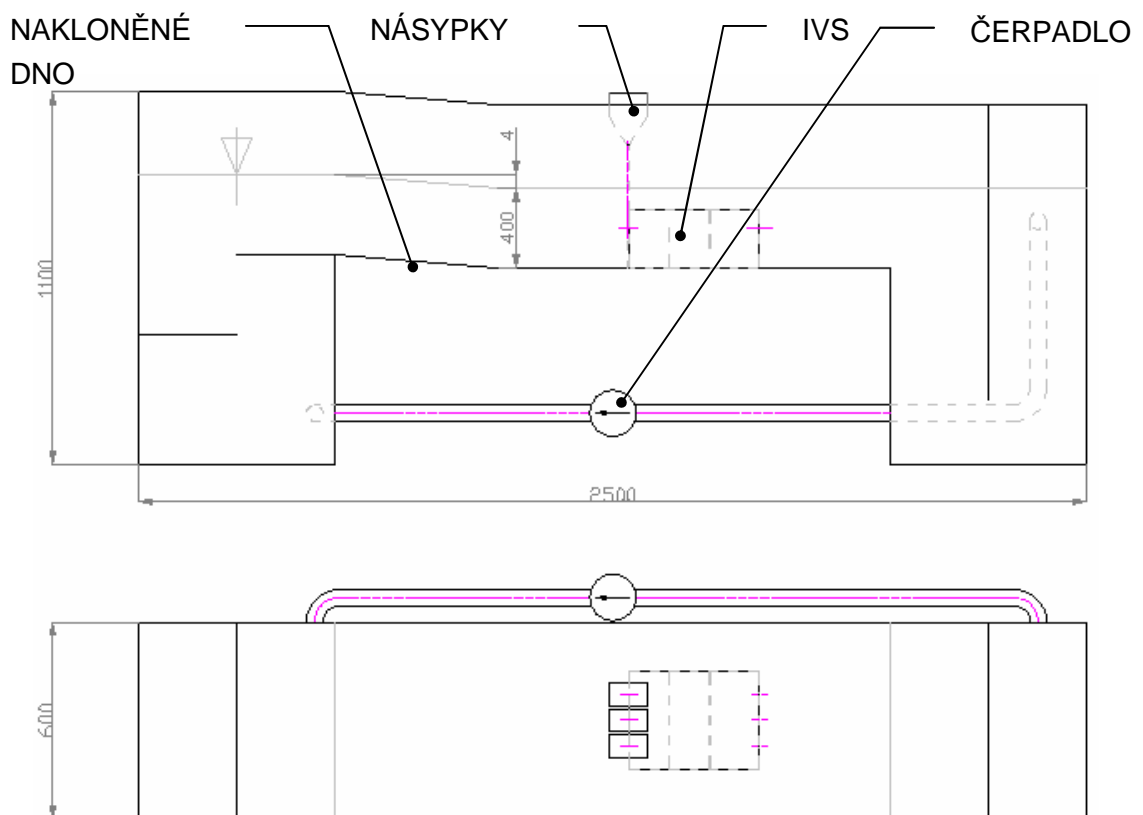
Princip je založen na vzájemném rozdílu dvou hladin a skutečnosti, že kapalina v místě s vyšší hladinou má tendenci proudit do míst s nižší hladinou. Rozdíl hladin je možné využít několika způsoby.

Uvažuje se modelování proudění v rámci celého „koryta řeky“ včetně proudění kolem vzorkovače. Toto řešení by mělo zajistit dostatečnou shodu experimentálních podmínek se skutečností. Pro potřeby experimentu připadají v úvahu dvě možnosti řešení:

- S nakloněným dnem
- Výtokem pod stavidlem

#### ad a) varianta s nakloněným dnem:

Na **Obr. 24** je schematicky zobrazen zkušební okruh, kde levá strana představuje místo se zvýšenou hladinou udržovanou v konstantní výšce. Odtud kapalina díky nakloněné rovině proudí směrem ke vzorkovači.



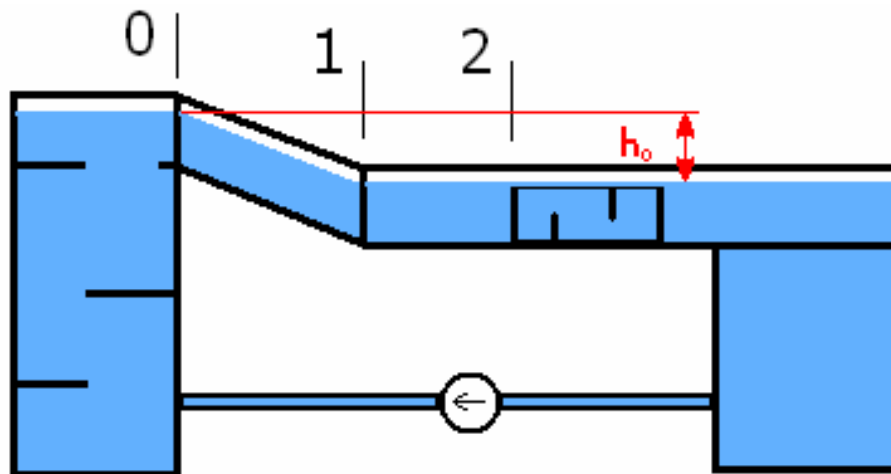
**Obr. 24** – Schéma varianty se šikmým dnem. Pohled z boku a shora

Těsně před čelní stěnou IVS je umístěna směšovací deska, která umožňuje smíchání suspenze ze tří násypů s čistou vodou v „korytě“. Systém v podstatě zjednodušeně modeluje celé říční koryto, včetně proudění podél vzorkovače.

Velikost rozdílu hladin pro rychlost proudění před vzorkovačem lze spočítat úpravou Bernoulliho rovnice (4). Dráha proudu kapaliny je rozdělena na dva dílčí úseky (**Obr. 25**), přičemž každý je řešen samostatně a platí pro něj různé úpravy Bernoulliho rovnice:

Řešení vychází z požadované rychlosti proudění v korytě kanálu odpovídající rychlosti proudění v řece (zdroj [7])

$$v_2 = 0,25 - 0,5 \text{ m/s} \quad \text{zvoleno } v_2 = 0,25 \text{ m/s}$$



**Obr. 25** – Rozdělení úseků pro výpočetní řešení

#### Rovný úsek 1 – 2:

a) Bernoulliho rovnice v obecném tvaru:

$$\frac{p_1}{\rho} + \frac{\alpha_1 \cdot v_1^2}{2} + g \cdot h_1 = \frac{p_2}{\rho} + \frac{\alpha_2 \cdot v_2^2}{2} + g \cdot h_2 + Y_{1,2} \quad (4)$$

b) Tlaky  $p_1 = p_2 = 0$ , jelikož se jedná o proudění s volnou hladinou  
 Coriolisovo číslo  $\alpha_1 = \alpha_2 = 1$ , pro běžné výpočty  
 Výška hladiny  $h_1 = h_2 = 0$ , jelikož se jedná o horizontální proudění a body proudnice leží ve stejné výšce

Bernoulliho rovnici lze potom psát v upraveném tvaru s neznámou  $v_1$ :

$$\frac{v_1^2}{2} = \frac{v_2^2}{2} + Y_{z1,2} \quad (5)$$



c) Výpočet ztrát  $Y_{z1,2}$ :

vychází z předpokladu, že na úseku 1 – 2 se budou vyskytovat pouze ztráty délkové. Rychlost  $v_2$  bude tedy oproti rychlosti  $v_1$  snižena o ztráty způsobené třením kapaliny o stěny koryta a dno. Výpočtu ztrát předchází určení ztrátového součinitele  $\lambda$ .

Výpočet hydraulického poloměru:

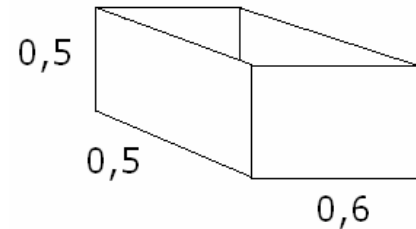
Délka úseku  $L = 0,5$  m

Šířka koryta  $b = 0,6$  m

Výška hladiny v korytě  $a = 0,5$  m

S...průřez koryta

o...omočený obvod



**Obr. 26** – Hlavní rozměry koryta v úseku 1 – 2

$$D_h = \frac{4 \cdot S}{o}$$

$$D_h = \frac{4 \cdot a \cdot b}{2 \cdot a + b} \quad (6)$$

$$D_h = \frac{4 \cdot 0,5 \cdot 0,6}{2 \cdot 0,5 + 0,6}$$

$$D_h = 0,75 \text{ m}$$

Výpočet Reynoldsova čísla:

Technická hodnota kinematické viskozity  $\nu = 1,275 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$

Kritická hodnota Reynoldsova čísla  $Re_k = 2320$

$$Re = \frac{v_2 \cdot D_h}{\nu}$$

$$Re = \frac{0,25 \cdot 0,75}{1,275 \cdot 10^{-6}} \quad (7)$$

$$Re = 147058$$

$Re > Re_k \rightarrow$  turbulentní proudění

Výpočet relativní drsnosti koryta:

Předpokládaná absolutní drsnost stěn  $k = 0,1$  mm (viz [14], str. 105)

$$k_r = \frac{k}{D_h}$$

$$k_r = \frac{0,1 \cdot 10^{-3}}{0,75} \quad (8)$$

$$k_r = 1,33 \cdot 10^{-4}$$

Dle kriterijního diagramu pro  $k_r$  jako funkci  $Re$  (viz zdroj [14]) se jedná o 1. režim proudění, součinitel ztrát je funkcí pouze Reynoldsova čísla a je určen vztahem dle Konakova:

$$\lambda = \frac{1}{(1,8 \cdot \log Re - 1,5)^2}$$

$$\lambda = \frac{1}{(1,8 \cdot \log 147058 - 1,5)^2} \quad (9)$$

$$\lambda = 0,016$$

Výpočet ztrátové energie:

$$Y_{z1,2} = \frac{v_2^2}{2} \cdot \left( \lambda \cdot \frac{L}{D_h} \right)$$

$$Y_{z1,2} = \frac{0,25^2}{2} \cdot \left( 0,016 \cdot \frac{0,5}{0,75} \right) \quad (10)$$

$$Y_{z1,2} = 0,33 \cdot 10^{-3} J / kg$$

d) Výpočet rychlosti  $v_1$  vyjádřením z Bernouliho rovnice:

$$v_1^2 = v_2^2 + 2 \cdot Y_{z1,2}$$

$$v_1 = v_2 + \sqrt{2 \cdot Y_{z1,2}} \quad (11)$$

$$v_1 = 0,25 + \sqrt{2 \cdot 0,33 \cdot 10^{-3}}$$

$$v_1 = 0,28 m / s$$

### Úsek s nakloněným dnem 0 – 1:

a) Bernouliho rovnice v obecném tvaru:

$$\frac{p_0}{\rho} + \frac{\alpha_0 \cdot v_0^2}{2} + g \cdot h_0 = \frac{p_1}{\rho} + \frac{\alpha_1 \cdot v_1^2}{2} + g \cdot h_1 + Y_{0,1} \quad (12)$$

b) Tlaky  $p_0 = p_1 = 0$ , jelikož se jedná o proudění s volnou hladinou

Coriolisovo číslo  $\alpha_0 = \alpha_1 = 1$ , pro běžné výpočty

Výška hladiny  $h_1 = 0$ , jelikož se jedná o stejný bod jako v předcházejícím úseku

Rychlost  $v_0 \rightarrow 0$ , zjednodušeně  $v_0 = 0$  za předpokladu, že kapalina je v místě zvýšené hladiny v klidu

Bernouliho rovnici lze potom psát v upraveném tvaru s neznámou  $H_1$ :

$$g \cdot h_0 = \frac{v_1^2}{2} + Y_{z0,1} \quad (13)$$



c) Výpočet ztrát  $Y_{z0,1}$ :

vychází z předpokladu, že na úseku 0 – 1 se budou vyskytovat pouze ztráty délkové.

Výpočet hydraulického poloměru:

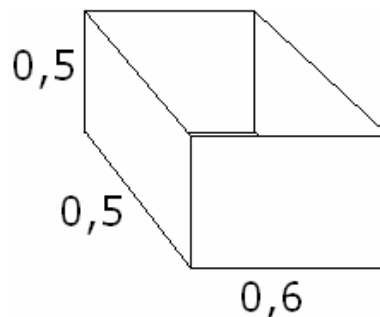
Délka úseku  $L = 0,5$  m

Šířka koryta  $b = 0,6$  m

Výška hladiny v korytě  $a = 0,5$  m

$S$ ...průřez koryta

$o$ ...omočený obvod



**Obr. 27** – Hlavní rozměry koryta v úseku 0 - 1

$$D_h = \frac{4 \cdot S}{o}$$

$$D_h = \frac{4 \cdot a \cdot b}{2 \cdot a + b} \quad (14)$$

$$D_h = \frac{4 \cdot 0,5 \cdot 0,6}{2 \cdot 0,5 + 0,6}$$

$$D_h = 0,75 \text{ m}$$

Výpočet Reynoldsova čísla:

Technická hodnota kinematické viskozity  $\nu = 1,275 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$

Kritická hodnota Reynoldsova čísla  $Re_K = 2320$

$$Re = \frac{v_1 \cdot D_h}{\nu}$$

$$Re = \frac{0,28 \cdot 0,75}{1,275 \cdot 10^{-6}} \quad (15)$$

$$Re = 164705$$

$Re > Re_K \rightarrow$  turbulentní proudění

Relativní drsnost koryta (viz předchozí výpočet):

$$k_r = 1,33 \cdot 10^{-4}$$

Dle kriterijního diagramu pro  $k_r$  jako funkci  $Re$  (viz zdroj [14]) se jedná o 1. režim proudění, součinitel ztrát je funkcí pouze Reynoldsova čísla a je určen vztahem dle Konakova:

$$\lambda = \frac{1}{(1,8 \cdot \log Re - 1,5)^2}$$

$$\lambda = \frac{1}{(1,8 \cdot \log 164705 - 1,5)^2} \quad (16)$$

$$\lambda = 0,016$$

Výpočet ztrátové energie:

Ztráta způsobená změnou směru proudu při proudění ze šikmého dna na rovné dno není uvažována – jedná se o malé změny směru proudění.

$$Y_{z1,2} = \frac{v_1^2}{2} \cdot \left( \lambda \cdot \frac{L}{D_h} \right)$$

$$Y_{z1,2} = \frac{0,28^2}{2} \cdot \left( 0,016 \cdot \frac{0,5}{0,75} \right) \quad (17)$$

$$Y_{z1,2} = 0,42 \cdot 10^{-3} \text{ J / kg}$$

d) Výpočet výšky hladiny pro dosažení rychlosti  $v_1$  vyjádřením z Bernoulliho rovnice:

Gravitační zrychlení  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$

$$h_0 = \frac{v_1^2}{2 \cdot g} + \frac{Y_{z0,1}}{g}$$

$$h_0 = \frac{0,28^2}{2 \cdot 9,81} + \frac{0,42 \cdot 10^{-3}}{9,81} \quad (18)$$

$$h_0 = 0,004 \text{ m}$$

Z výpočtu je vyplývá, že rozdíl výšky hladin je asi 4 mm.

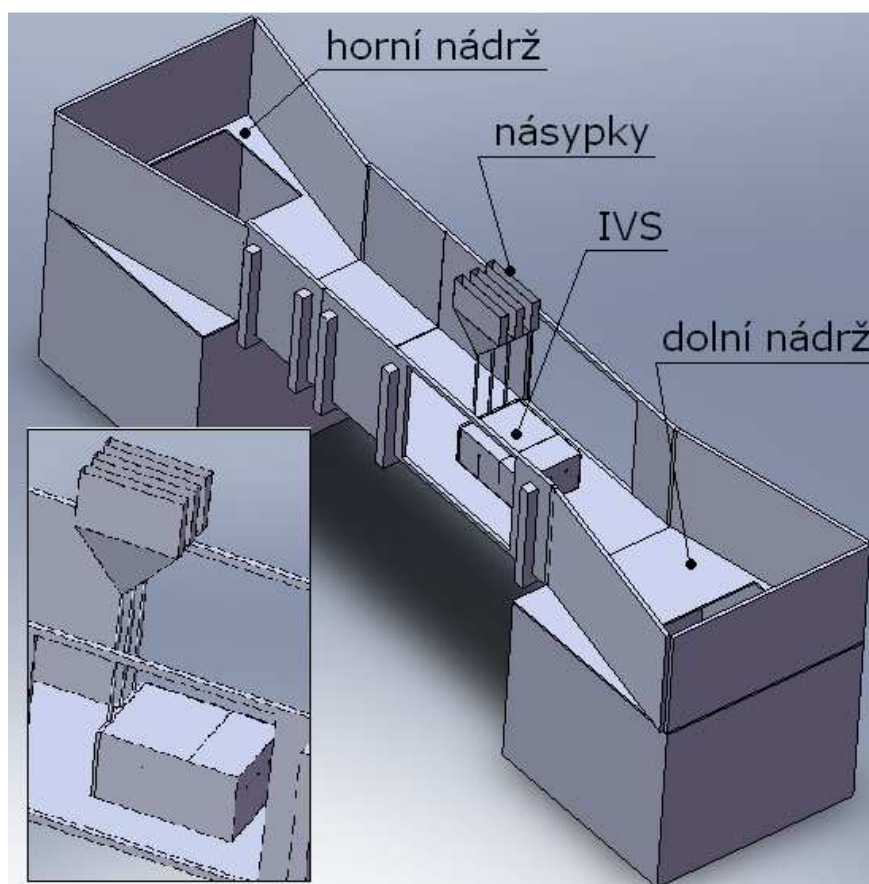
Aby mohlo být zjištěno nakolik je tato varianta vhodná k realizaci, byl vytvořen počítačový model (**Obr. 28**).

### Konstrukce:

Koryto je řešeno jako šroubovaná konstrukce z lakované překližky o tloušťce 20 mm. Šikmé dno s možností změny úhlu sklopení (a tím změny rychlosti proudění) je k rovnému dnu připevněno panty. Pohyblivé části jsou utěsněny pryžovou tkaninou, pevné silikonovým tmelem. Výška bočnic koryta je 500 mm, šířka koryta v místě umístění IVS je 600 mm. Celé koryto je staženo dřevěnými svorkami. V okolí umístění IVS jsou po obou stranách bočních stěn koryta vyříznuta dvě okna o rozměrech 480 mm × 700 mm a překryta plexisklem tloušťky 10 mm, která mají umožnit vizuální pozorování jevů v IVS.

Experimentální IVS je vyroben dle skutečné předlohy lepením z plexiskla tloušťky 5 mm s odnímatelným víkem. Přepážky uvnitř IVS jsou konstruovány z plexiskla tloušťky 3 mm. Horní i dolní nádrž jsou řešeny jako svařované konstrukce z plechu. Přepážky uvnitř horní nádrže mají zajistit dostatečné uklidnění kapaliny po výstupu z čerpadla tak, aby bylo možné uvažovat rychlost proudění v horní nádrži za nulovou. Lze využít i komerčně vyráběných typů nádrží.

Celý systém má však velké požadavky na čerpadlo.



**Obr. 28** – Počítačový model gravitační varianty s nakloněným dnem

Požadovaný průtok vychází z průřezu koryta a potřebné rychlosti proudění:

$$Q = S \cdot v_2$$

$$Q = a \cdot b \cdot v_2$$

$$Q = 0,5 \cdot 0,6 \cdot 0,25$$

$$Q = 0,075 \text{ m}^3 / \text{s} = 75 \text{ l} / \text{s}$$

(19)

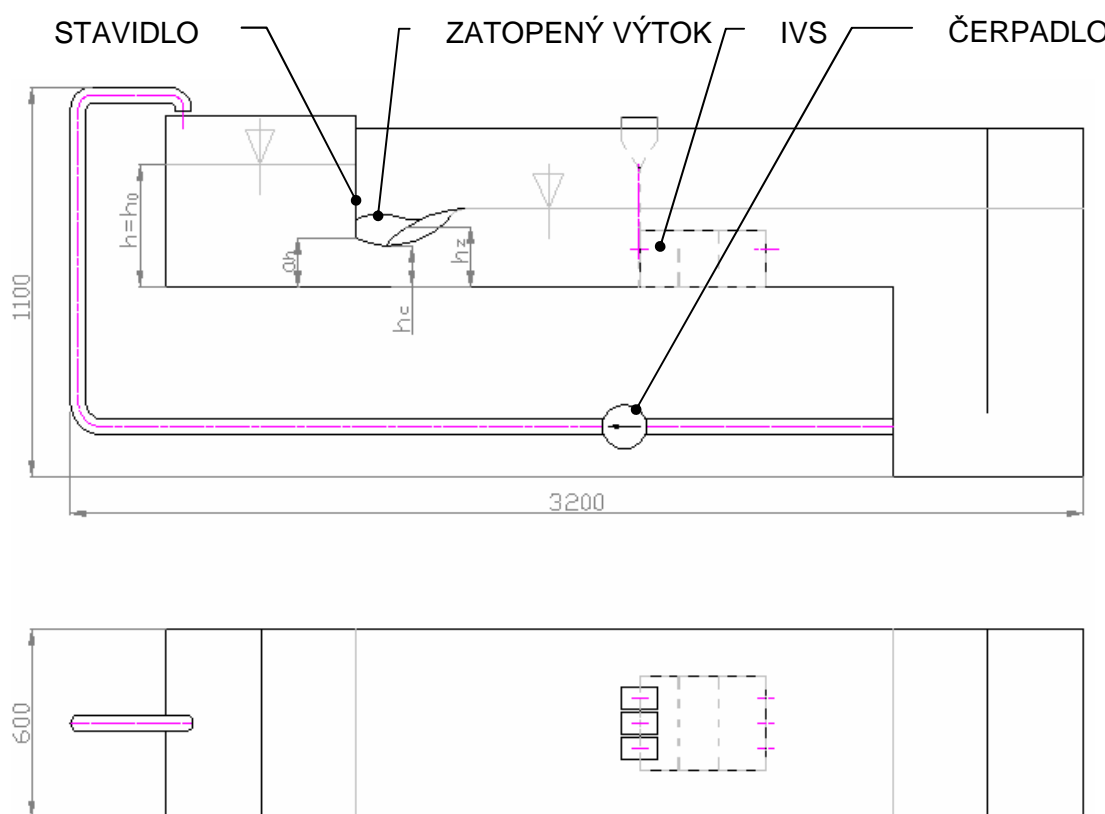
Čerpadlo musí zajistit průtok 75l/s a v případě potřeby zvýšení rychlosti v korytě na 0,5m/s dokonce 150l/s. Pro citlivou regulaci na konstantní výšku hladiny v horní nádrži je třeba obvod vybavit frekvenčním měničem nebo škrťacím ventilem a potrubím o světlosti zaručující převedení uvedeného množství kapaliny.

Systém nevyhovuje požadavkům na nízkou cenu, jelikož komponenty, zejména čerpadlo, splňující dané parametry jsou velmi nákladné a celá konstrukce je značně prostorově náročná (viz **Obr. 24**).

Zejména z těchto důvodů nebyla realizace tohoto typu experimentálního boxu uvažována a jednotlivé části nebyly podrobněji rozpracovány.

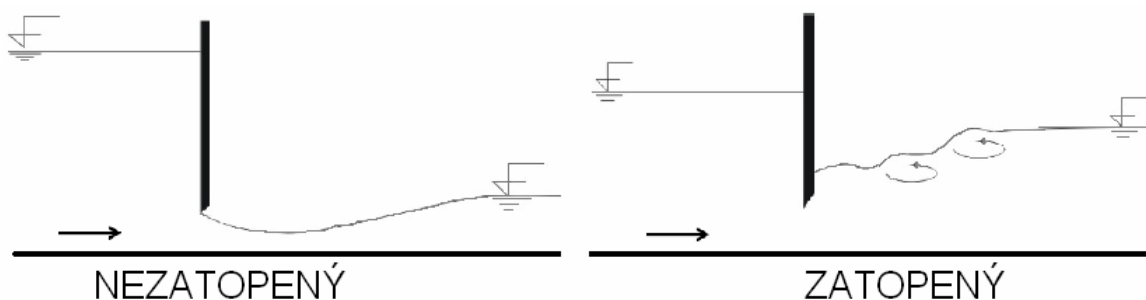
**ad b) varianta výtokem pod hradidlem:**

Princip řešení je velmi podobný předcházejícímu s tím rozdílem, že rozdíl hladin je vytvořen vzdutím kapaliny před stavidlem (schéma na **Obr. 29**).



**Obr. 29** – Schéma varianty se stavidlem. Zatopený výtok. Pohled z boku a shora

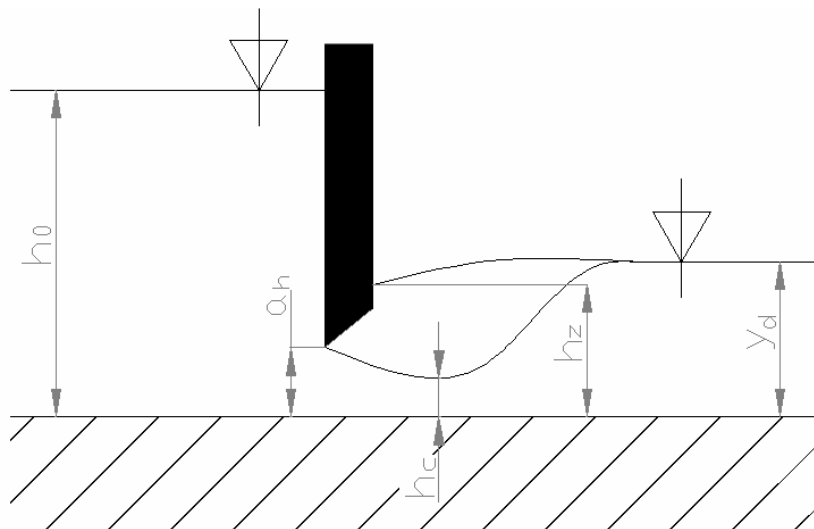
Průtok kapaliny pod stavidlem závisí na výškách hladin před a za stavidlem, průřezu koryta a zdvihu stavidla. Pokud kapalina dostatečně rychle neodtéká z prostoru za stavidlem, dojde k zatopení výtoku. V opačném případě se jedná o výtok nezatopený. Oba případy, které jsou podrobněji popsány např. ve zdroji [17], jsou zobrazeny na **Obr. 30**.



**Obr. 30** – Typy výtoků pod stavidlem  
[17]

Experimentální případ předpokládá zatopení výtoku, které je realizováno změnou výstupního průřezu. Menším průřezem kapalina hůře odtéká a má tendenci se hromadit v korytě, tzn. zvyšovat hladinu za stavidlem, až do té míry, než dojde k nalezení rovnovážného stavu mezi silou potřebnou k překonání odporu menšího průřezu a silou způsobenou hydrostatickým tlakem.

Výška otevření stavidla  $a_h$  vychází ze vztahů pro zatopený přepad (např. zdroj [17]), přičemž hlavní rozměry jsou zakresleny na **Obr. 31**.



**Obr. 31** – Výpočetní rozměry zatopeného výtoku

známé jsou následující hodnoty:

Šířka koryta	$b = 0,6 \text{ m}$
Výška hladiny v místě IVS	$a = 0,4 \text{ m} = y_d$
Výška hladiny před stavidlem	$h_0 = 0,45 \text{ m}$
Rychlost proudění před IVS	$v = 0,25 \text{ m/s}$
Rychlostní součinitel	$\varphi = 0,95$
Gravitační zrychlení	$g = 9,81 \text{ m/s}^2$

Výpočet průtoku korytem:

$$Q = S \cdot v$$

$$Q = a \cdot b \cdot v$$

$$Q = 0,4 \cdot 0,6 \cdot 0,25$$

$$Q = 0,06 \text{ m}^3 / \text{s} = 60 \text{ l} / \text{s}$$

(20)

Základní vztah pro určení průtoku zatopeného výtoku:

$$Q = \varphi \cdot \varepsilon \cdot a_h \cdot b \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot (h_0 - h_z)}$$

(21)

Vyjádření výšky otevření stavidla  $a_h$ :

$$a_h = \frac{Q}{\varphi \cdot \varepsilon \cdot b \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot (h_0 - h_z)}} \quad (22)$$

kde

$\varepsilon$  je součinitel svislé kontrakce, pro nějž platí:

$$\varepsilon = 0,60651 + 0,103239 \cdot \frac{a_h}{h} - 0,252683 \cdot \left(\frac{a_h}{h}\right)^2 + 0,385621 \cdot \left(\frac{a_h}{h}\right)^3 \quad (23)$$

$h_z$  je výška zatopení, pro kterou platí:

$$h_z = \frac{h_c}{2} \cdot \left( -1 + \sqrt{1 + \frac{8 \cdot Q^2}{g \cdot b^2 \cdot h_c^3}} \right) \quad (24)$$

$h_c$  je nejmenší výška výtokového proudu, kterou lze určit ze vztahu:

$$h_c = \varepsilon \cdot a_h \quad (25)$$

Z uvedených vztahů je patrné, že  $\varepsilon$  a  $h_c$  jsou funkcí výšky otevření stavidla  $a_h$  a po dosazení těchto veličin do vztahu pro  $a_h$  jsou neznámé  $a_h$  na obou stranách. Rovnici je třeba řešit iterativně.

Vstupní hodnoty do výpočtu ukazuje **Tab. 2**. Výsledky výpočtů veličin v jednotlivých iteracích jsou zapsány v tabulce **Tab. 3**

šířka kanálu b	0,6	m
výška hladiny a	0,4	m
plocha S	0,24	m <sup>2</sup>
rychlost v	0,25	m/s
průtok Q	0,06	m <sup>3</sup> /s
souč $\varphi$	0,95	
grav. zrychlení	9,81	m/s <sup>2</sup>
výška hl. v nádrži $h_0$	0,45	m

**Tab. 2** – Vstupní parametry

Podmínkou konvergence je, že:

počáteční zvolená hodnota  $a_h \leq h_0$

výška hladiny v místě IVS  $a < h_0$ .

Cyklus zkonverguje po 20-ti iteracích na nové hodnotě  $a_h$ .

Iterace	$a_h$	$\varepsilon$	$h_c$	$h_z$
Tip	0,4	0,76946119	0,307784475	0,020196041
01	0,047109	0,61499095	0,028971681	0,251182745
02	0,086662	0,61977485	0,053711228	0,169813083
03	0,072438	0,61818965	0,044780687	0,192152086
04	0,075705	0,61856277	0,046828164	0,186549616
05	0,07485	0,61846579	0,046292366	0,187984538
06	0,075067	0,6184904	0,046428079	0,187619056
07	0,075011	0,61848412	0,046393414	0,187712277
08	0,075026	0,61848572	0,04640225	0,187688509
09	0,075022	0,61848531	0,046399997	0,18769457
10	0,075023	0,61848541	0,046400571	0,187693024
11	0,075023	0,61848539	0,046400425	0,187693418
12	0,075023	0,61848539	0,046400462	0,187693318
13	0,075023	0,61848539	0,046400452	0,187693343
14	0,075023	0,61848539	0,046400455	0,187693337
15	0,075023	0,61848539	0,046400454	0,187693338
16	0,075023	0,61848539	0,046400454	0,187693338
17	0,075023	0,61848539	0,046400454	0,187693338
18	0,075023	0,61848539	0,046400454	0,187693338
19	0,075023	0,61848539	0,046400454	0,187693338
výsledek	0,075023	0,61848539		

**Tab. 3** – Výsledky iteračního výpočtu

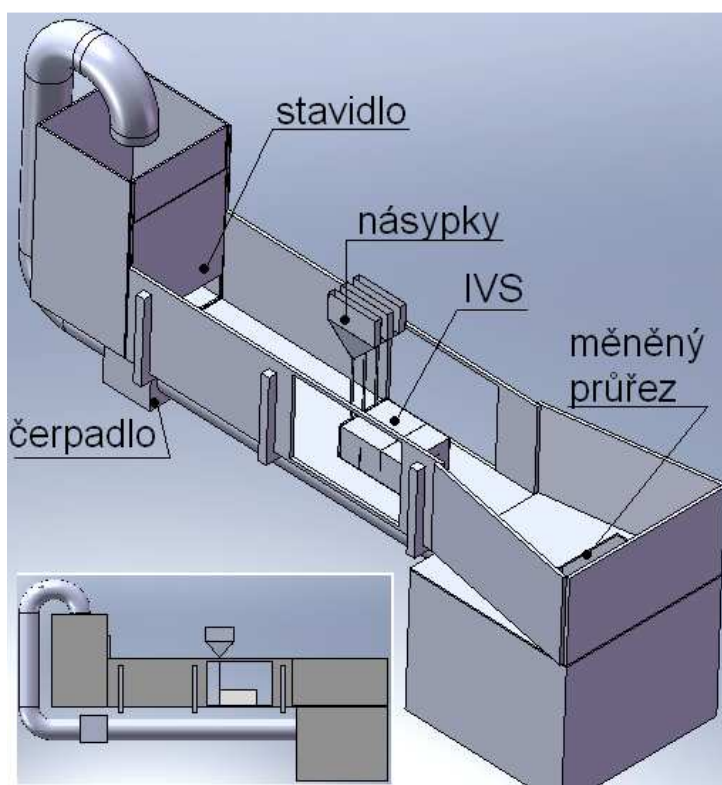
Výška otevření stavidla pro zadané parametry je 7,5 cm ode dna koryta.

Teorie výpočtu zatopeného výtoku pod stavidlem uvažuje, že výška dolní vody  $y_d$  v dostatečné vzdálenosti pod stavidlem je blízká výšce zatopení  $h_z$  u stavidla (viz **Obr. 31**).

Provedený výpočet sice určil výšku zatopení  $h_z$  na 187 cm, což vyhovuje obecné podmínce experimentu, že IVS o výšce 180 cm musí být zcela zatopen vodou, avšak převládá reálná obava, že uvažované výšky hladiny  $\underline{a}$  resp.  $\underline{y_d} = 400$  cm v místě umístění IVS nebude dosaženo. Tato situace by znamenala jiné hodnoty průtoku, a tím i jiné hodnoty rychlosti proudění.

Před experimentálním měřením by proto byla nutná kalibrace vztahu mezi výškou otevření stavidla, výškou hladiny před stavidlem a rychlostí proudění před IVS, která by ověřila platnost uvedených výpočtů.

Stejně jako v předchozím případě byl i pro variantu se stavidlem vytvořen počítačový model (**Obr. 32**)



**Obr. 32** – Počítačový model varianty se stavidlem

### Konstrukce

- je blízká předchozí variantě s nakloněným dnem.

Koryto šroubované z lakované překližky tloušťky 20 mm, staženo dřevěnými svorkami. Výška bočnic je 500 mm, šířka dna je 600 mm. Dvě okna o rozměrech 480 mm × 700 mm vyříznuta do bočnic a překryta plexisklem tloušťky 10 mm mají umožnit vizuální pozorování jevů v IVS. Horní nádrž konstruována jako svarek z plechu je vybavena vedením s aretací pro stavidlo. Dolní nádrž je též vyrobená svařováním z plechu a překryta víkem s vyříznutým otvorem, jehož průřez bude měněn v závislosti na požadované výšce hladiny. Těsnost komponentů je zajištěna silikonovým tmelem.

Počítačový model prokázal, že je varianta se stavidlem, podobně jako řešení s nakloněným dnem, velmi prostorově náročná (hlavní rozměry na **Obr. 29**). Stejně tak i požadavky na čerpadlo jsou z hlediska průtoku (60 l/s) velké. Další nevýhodou je již zmíněná nutnost kalibrace a obtížné sledování konstantní výšky hladiny v nádrži před stavidlem.

Realizace varianty nebyla uvažována a jednotlivé části nebyly podrobněji rozpracovány.

Vzhledem k tomu, že žádná z variant není vhodná k realizaci, byl celý princip experimentu zjednodušen pouze na modelování proudění v rámci vzorkovače. Proudění podél IVS nebude modelováno. Zjednodušeným požadavkům odpovídají následující varianty:

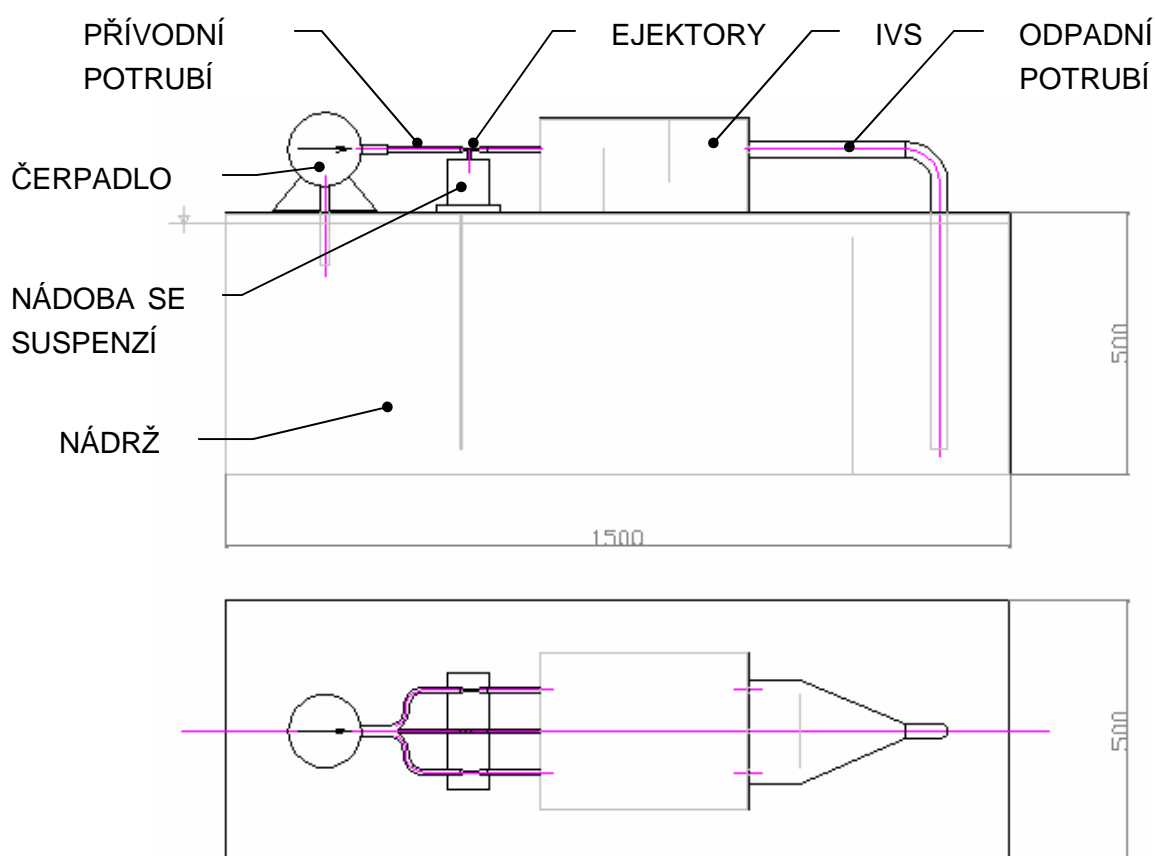


## 2. Ejektorová:

Proud kapaliny je směřován pouze do tří vstupních otvorů, nikoliv na celou čelní stěnu IVS.

Na **Obr. 33** je zobrazeno schéma experimentálního obvodu. Hlavní princip varianty spočívá v použití tří ejektorů jako prvků pro smísení vody se suspenzí. Ejektor je součástka, která pomocí podtlaku vytvořeného proudícím hnacím médiem (v tomto případě čisté vody) umožňuje přisávání jiného média (suspenze vody s pískem).

Čerpadlo jako zdroj průtoku dodává požadované množství kapaliny do přívodního potrubí. Potrubí je za čerpadlem rozděleno na tři větve, na každé z nich je instalován ejektor. Nádoba se suspenzí je umístěna pod ejektory. Přívodní potrubí je zakončeno vstupem do IVS. Odpadní potrubí na výstupu z IVS je řešeno jako společný konfuzorový profil pro všechny tři otvory. Uvedené řešení je voleno z důvodu vytvoření většího prostoru pro odtok kapaliny, s tím spojené nižší ztráty na výstupu, a tedy menší možnost ovlivňování jevů ve vzorkovači odtékající kapalinou. Odpadní potrubí je směřováno do nádrže sloužící jako zdroj vody pro celý okruh a jako dodatečná sedimentační nádrž pro pevné částice, které se ve vzorkovači neusadily. Proto je nádrž vybavena dělicími přepážkami.



**Obr. 33** – Schéma varianty s ejektory. Pohled z boku a shora

Celé řešení je jednoduché a levné. Největší nevýhodu je fakt, že rychlosti proudění v přívodním potrubí jsou malé a ejektor by tak nemusel vytvořit dostatečný podtlak pro nasátí potřebného množství suspenze. Dalším problémem může být možnost zanesení a ucpání ejektoru pevnými částicemi suspenze, nemožnost regulace množství přisávané suspenze a také stav, že nedojde k úplnému zatopení celého prostoru IVS vodou.

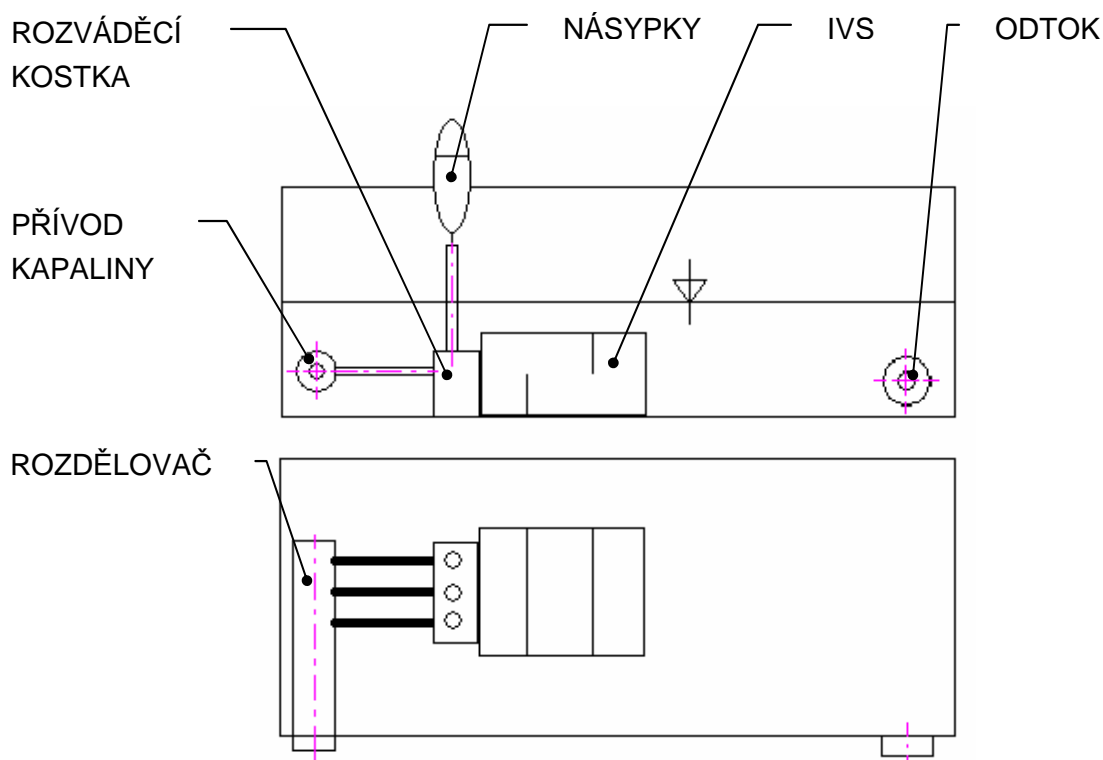
Realizace varianty nebyla uvažována.

### 3. S rozváděcí kostkou:

Podobně jako v předchozím případě, je proud kapaliny směřován pouze do tří vstupních otvorů a je tak simulováno jen vnitřní proudění ve vzorkovači.

Kapalina z čerpadla je přivedena do rozdělovače, v němž je proud rozdělen na tři paprsky disponující stejným průtokem. Hadicemi jsou tyto paprsky vedeny do rozváděcí kostky, kde dojde ke smísení se suspenzí ze tří násypky a následně do vlastního vzorkovače. IVS je společně s ostatními komponenty umístěna v průhledné nádrži, která slouží k dokonalému zatopení vzorkovače. Voda však proudí pouze hadicemi.

Na **Obr. 34** je zobrazeno zjednodušené schéma varianty. Součástí sestavy je ještě vnější obvod s čerpadlem, průtokoměrem a škrťacím ventilem, na **Obr. 34** však není zakreslen.



**Obr. 34** – Schéma varianty s rozváděcí kostkou.

*Pohled z boku a shora*

Závislost rychlostí v korytě řeky a rychlosti proudění na vstupu do IVS je uvedena v **Tab. 4** a vychází ze zdroje [7]. Rychlosti nejsou stejné, jelikož v těsné blízkosti před vzorkovačem je proudové pole ovlivněno čelní stěnou IVS – dochází ke snížení rychlosti proudění. Experimentální model směřuje paprsky vody přímo do vstupních otvorů, proto je v následujících výpočtech zahrnuta právě rychlost proudění na vstupu do IVS.

Rychlost v korytě řeky [m/s]	Rychlost na vstupu do IVS [m/s]
0,25	0,19
0,5	0,27

**Tab. 4** – Velikost rychlosti proudění na vstupu do IVS v závislosti na rychlosti proudění v řece

Celkový průtok, který musí čerpadlo po dobu experimentu dodávat:

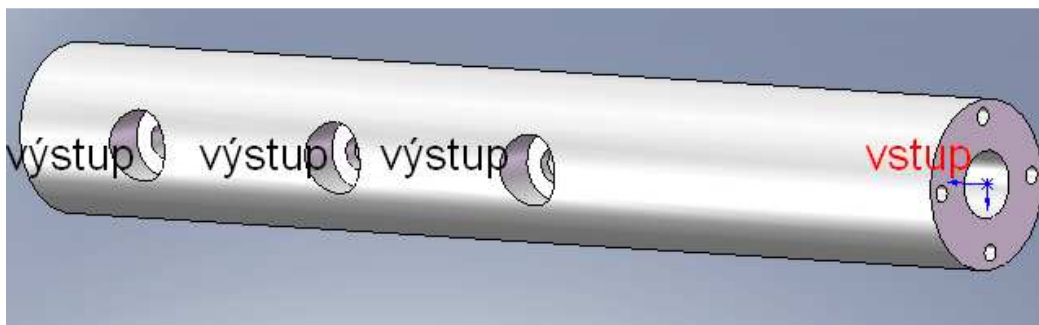
$$\begin{aligned}
 Q &= S_o \cdot v \cdot i \\
 Q &= \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot v \cdot i \\
 Q &= \frac{\pi \cdot 0,01^2}{4} \cdot 0,27 \cdot 3 \\
 Q &= 6,36 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3 / \text{s} = 0,063 \text{ l} / \text{s}
 \end{aligned} \tag{26}$$

kde:

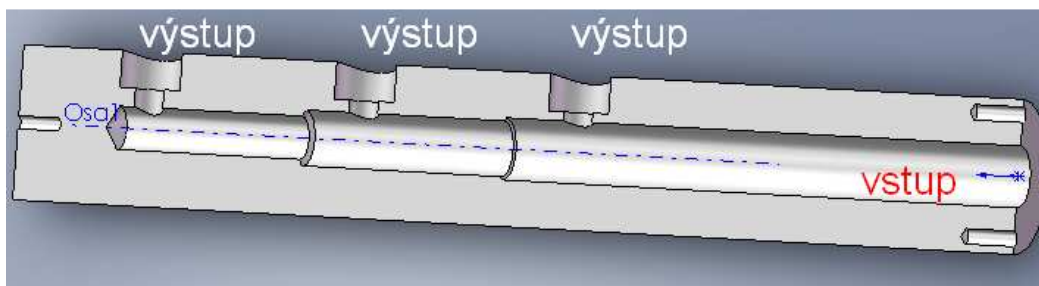
- $S_o$  je plocha 1 vstupního otvoru [ $\text{m}^2$ ]
- $v$  je rychlost proudění na vstupu do IVS [m/s] (vyšší hodnota z **Tab. 4**)
- $i$  je počet vstupních otvorů [-]

Tak jako ve skutečnosti řeka zásobuje vodou všechny tři otvory stejně, je nutné i v experimentálním případě přivést do všech tří otvorů stejné množství. Splnění této podmínky, tj. rozdělení jednoho proudu z čerpadla na tři proudy o stejném průtoku zajišťuje součástka na **Obr. 34** pojmenovaná jako rozdělovač. Správné navržení rozdělovače má zásadní vliv na funkčnost celého celku.

Rozdělení proudu je řešeno odstupňovaným vyvrtáním silonového válce do přesně určených hloubek a vyvedením odtoků v přesných vzdálenostech od čela rozdělovače (**Obr. 35** a **Obr. 36**). Základní hypotéza konstrukce vychází z úvahy, že průměr vrtáku se musí s narůstající hloubkou zavrtání snižovat. Menší průměr díry tak kompenzuje úbytky množství kapaliny na výstupech a tím dochází k zachování rychlostních poměrů v jednotlivých větvích. Při stejných světlostech hadic všech tří výstupů to znamená též zachování průtoků.



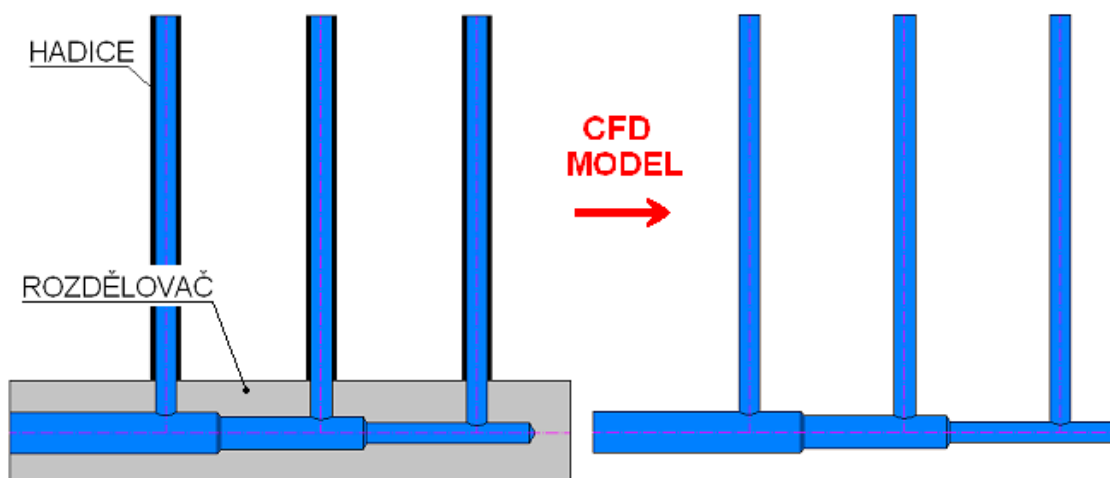
**Obr. 36** – Rozdělovač. Celkový pohled



**Obr. 35** – Rozdělovač. Řez rovinou symetrie

Tvar vnitřního rozvodu rozdělovače je poměrně složitý a není možné jednoduchými matematickými rovnicemi popsat závislost průměru děr a hloubek zavrtání tak, aby byla splněna podmínka stejných rychlostí na výstupech. Z toho důvodu je nutné problematiku řešit postupnou optimalizací vhodně zvoleného počátečního tvaru pomocí výpočetního modelování proudění (**CFD**) uvnitř rozdělovače.

CFD modelování simuluje proudění kapaliny. Výpočetní model zahrnuje pouze místa, v nichž se vyskytuje objem kapaliny. Okolní materiál není pro výpočet podstatný a do výpočetního modelu není zahrnut (viz **Obr. 37**)



**Obr. 37** – Princip vytvoření CFD modelu

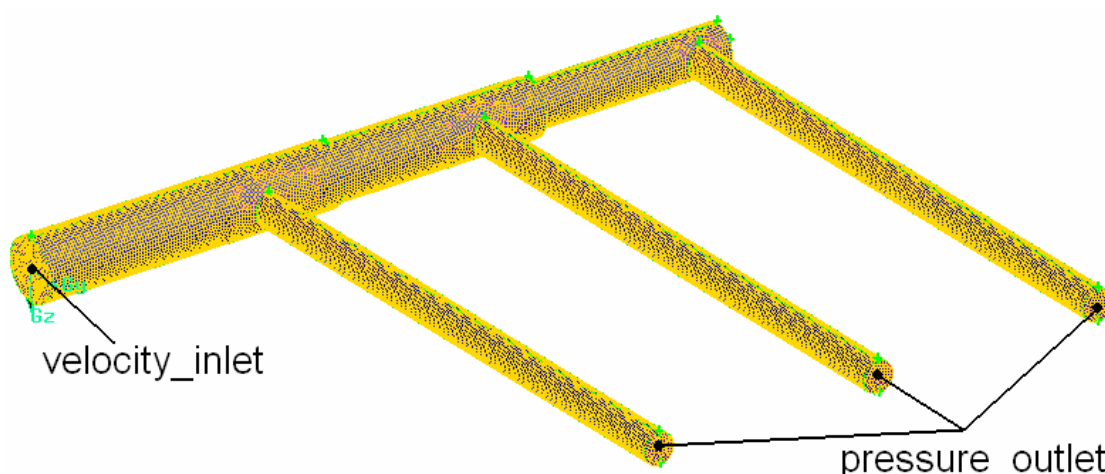
### Výpočtové modelování proudění (CFD) zahrnuje:

- Vytvoření virtuálního 3D modelu odpovídajícího skutečným rozměrům součásti
- Vytvoření výpočetní sítě na tomto modelu
- Předepsání okrajových podmínek jednotlivým plochám modelu
- Řešení příslušného systému rovnic
- Vyhodnocení výsledků

Model kapaliny byl vytvořen v programu **SolidWorks®**, poté proběhl export do programu **Gambit®**, v němž byla vytvořena výpočetní síť (**Obr. 38**)

Na **Obr. 39** je zobrazen tvar vnitřního uspořádání rozdělovače pro optimalizaci. Počátek souřadného systému je shodný se vstupní hranou rozdělovače. Výstup je přímý, jelikož výstupní paprsky mají stejný průměr ( $d_1 = 10 \text{ mm}$ ) i rozteče ( $= 75 \text{ mm}$ ) jako vstupní otvory v čelní stěně IVS.

Ostatní rozměry, délky  $L_1$ ,  $L_2$ ,  $L_3$  a průměry  $D_1$ ,  $D_2$ ,  $D_3$  byly voleny.



**Obr. 38** – Výpočetní síť modelu kapaliny se zobrazením okrajových podmínek na vstupu a výstupech

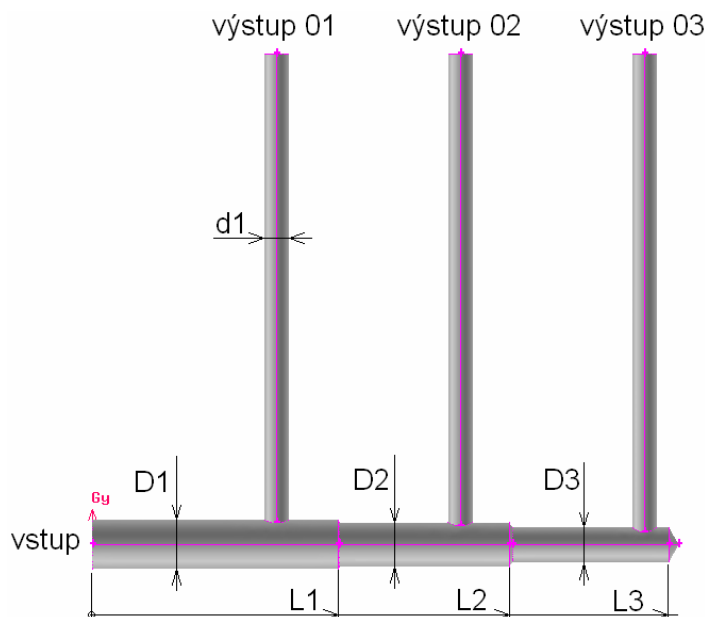
Výpočetní oblast pro jeden krok optimalizace tvoří více, než 450 000 výpočetních buněk. Buňky mají tvar čtyřstěnu. Okrajovou podmínkou na vstupu je podmínka *velocity\_inlet*, na výstupech *pressure\_outlet*. Ostatní plochy představují okrajovou podmínku *wall*. Stručný popis okrajových podmínek je uveden v **Tab. 5**.

název	podmínka
velocity inlet	Vstupní rychlost média odpovídá zadané hodnotě
pressure outlet	Výstupní přetlak odpovídá zadané hodnotě
wall	Částice nemohou proudit přes tyto plochy a platí podmínka ulpívání částic na stěně

**Tab. 5** – popis použitých okrajových podmínek

**Optimalizační výpočet probíhá následovně:**

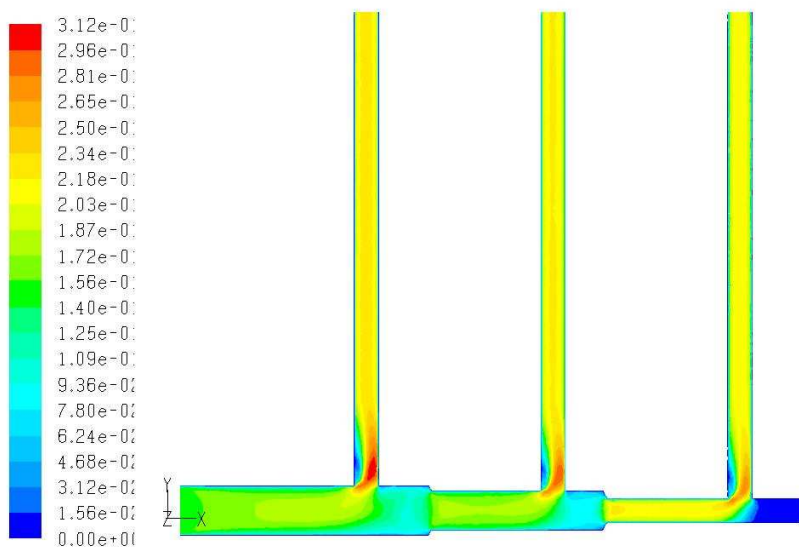
- 1) Zvolení počáteční geometrie L1, L2, L3, D1, D2, D3 a vytvoření výp. sítě
- 2) Výpočetní modelování proudění
- 3) Vyhodnocení průtoků plochami výstup 01, výstup 02, výstup 03. V případě, že nejsou stejné návrat do bodu 1)
- 4) Konec optimalizace

**Obr. 39** – Hlavní rozměry vnitřního rozvodu rozdělovače

Výpočetním softwarem *Fluent*® bylo proudění řešeno jako turbulentní realizace k- $\epsilon$  model turbulence s nerovnovážnými stěnovými funkcemi (non-equilibrium wall functions)

**Výchozí tvar:**

L1 = 100 mm  
L2 = 170 mm  
L3 = 250 mm  
D1 = 20 mm  
D2 = 16 mm  
D3 = 10 mm

**Obr. 40** – Rychlostní poměry na ose symetrie

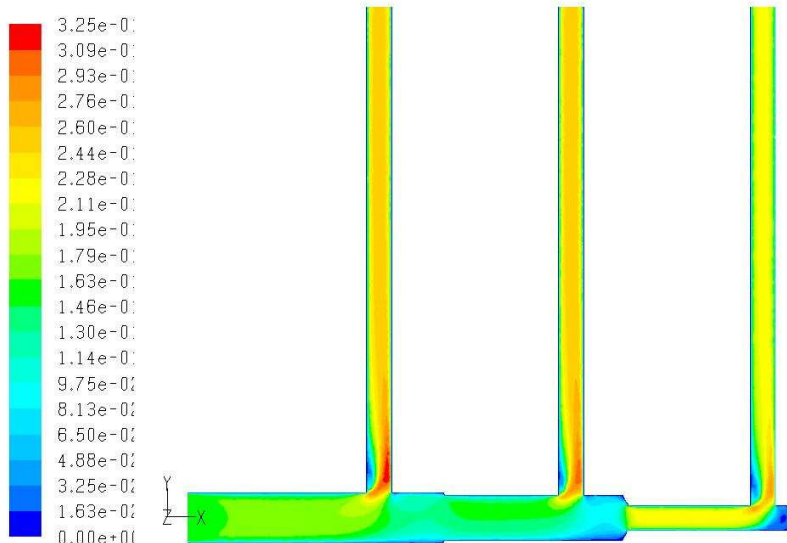
Průtoky v [l/s] pro vstupní rychlost 0,15 m/s	
Výstup 01	0,0160
Výstup 02	0,0156
Výstup 03	0,0151

Průtoky nejsou stejné. V následujícím kroku je zvětšen průměr D2 na D2 = 18 mm a zkrácena délka L3 na L3 = 235 mm

**Tab. 6** – Hodnoty průtoků

**2. krok:**

$L1 = 100 \text{ mm}$   
 $L2 = 170 \text{ mm}$   
 $L3 = 235 \text{ mm}$   
 $D1 = 20 \text{ mm}$   
 $D2 = 18 \text{ mm}$   
 $D3 = 10 \text{ mm}$

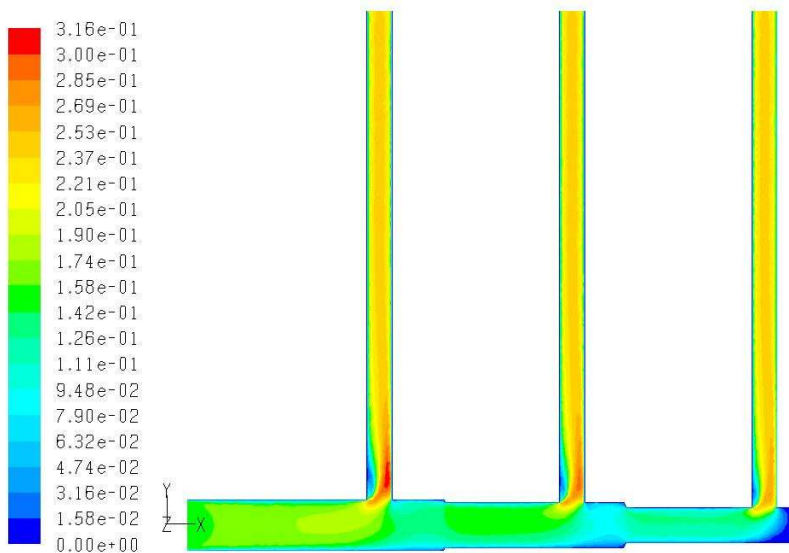
**Obr. 41** – Rychlostní poměry na ose symetrie

Průtoky v [l/s] pro vstupní rychlost 0,15 m/s	
Výstup 01	0,0163
Výstup 02	0,0154
Výstup 03	0,0140

Průtoky nejsou stejné. V následujícím kroku je zvětšen průměr  $D1$  na  $D = 14 \text{ mm}$ .

**Tab. 7** – Hodnoty průtoků**3. krok:**

$L1 = 100 \text{ mm}$   
 $L2 = 170 \text{ mm}$   
 $L3 = 235 \text{ mm}$   
 $D1 = 20 \text{ mm}$   
 $D2 = 18 \text{ mm}$   
 $D3 = 14 \text{ mm}$

**Obr. 42** – Rychlostní poměry na ose symetrie

Průtoky v [l/s] pro vstupní rychlost 0,15 m/s	
Výstup 01	0,0156
Výstup 02	0,0156
Výstup 03	0,0156

Průtoky jsou stejné. Třetím krokem končí optimalizace rozdělovače a uvedená geometrie je považována za konečnou.

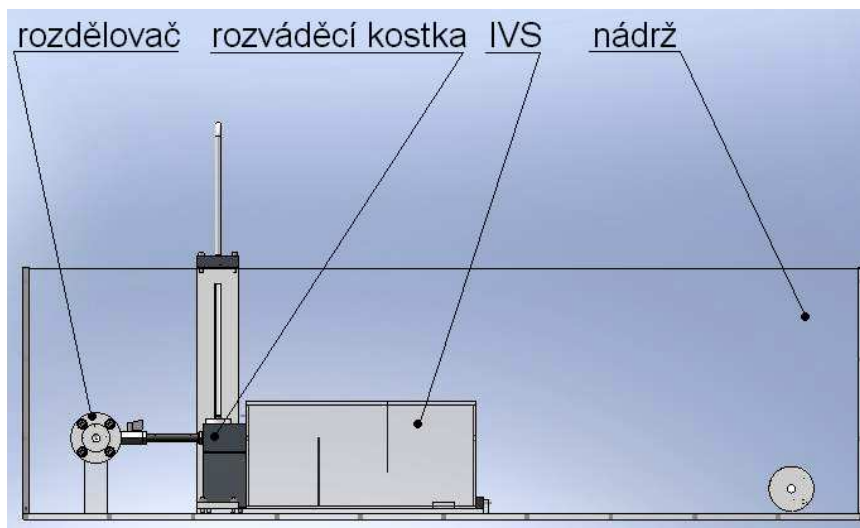
**Tab. 8** – Hodnoty průtoků



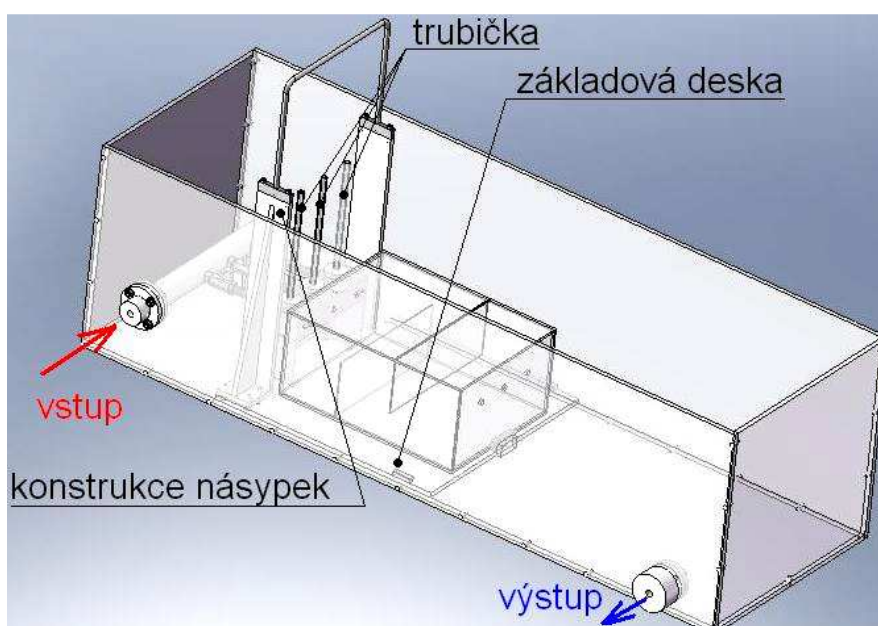
### 3.3. Výběr vhodné varianty a její konstrukce

Jako nejvhodnější byla **zvolena varianta s rozváděcí kostkou**.

Byl vytvořen počítačový model (**Obr. 43** a **Obr. 44**) a zpracována výkresová dokumentace (viz **Přílohy**).



**Obr. 43** – Varianta s rozváděcí kostkou. Pohled z boku



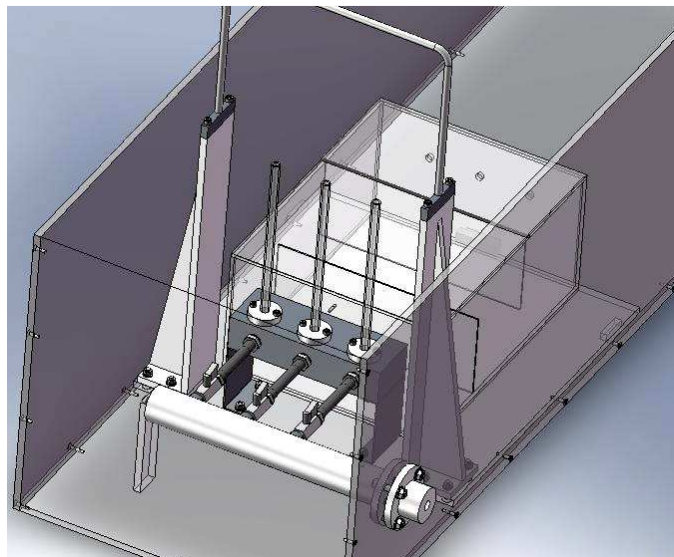
**Obr. 44** – Varianta s rozváděcí kostkou. Celkový pohled

#### Konstrukce:

**Nádrž** o rozměrech 1500 mm × 500 mm × 450 mm (délka × šířka × výška) je vyrobena z plexiskla tloušťky 10 mm. Jednotlivé stěny jsou lepeny a vzájemně sešroubovány šrouby M4 se zápusťnou hlavou. Na jedné z delších stěn jsou vyvrtány otvory  $\Phi 20$  mm a  $\Phi 40$  mm pro přívod a odtok vody vnějšího okruhu s čerpadlem.

**Přívod z čerpadla** je řešen hadicí DN 10, která je nalisována na nátrubek našroubovaný na vstupní přírubě závitem G 3/8" (na **Obr. 44** v místě červené šipky). Odtud je voda vedena do rozdělovače.

**Rozdělovač** je vyroben ze silonového válce o průměru 50 mm a délky 350 mm. Vnitřní uspořádání vychází z geometrie uvedené v kap. 3.2. Na každém výstupu rozdělovače je nalisováno pouzdro na jehož konci je vnější závit G 3/8", který slouží k přišroubování **škrtícího ventilu**. Každá výstupní větev je tedy vybavena vlastním regulačním prvkem, který umožňuje změnu popř. úplné zastavení průtoku nezávisle na průtocích v ostatních větvích.

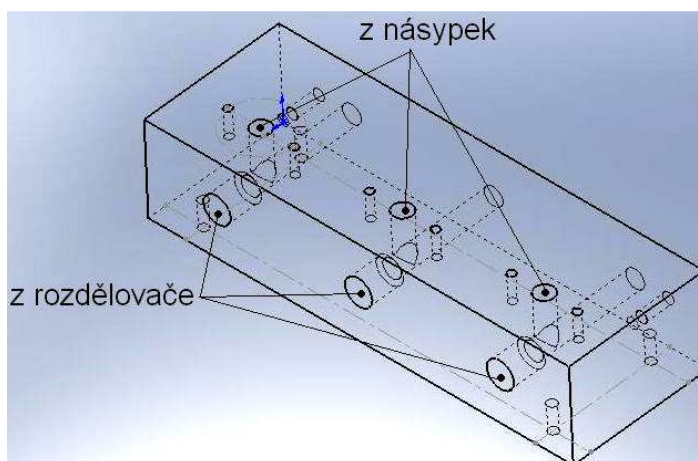


**Obr. 45** – Zapojení rozdělovače a rozváděcí kostky.

*Detail*

Mezi ventily a rozváděcí kostkou je kapalina vedena hadicemi DN 10. Na obou koncích hadice jsou nalisovány nátrubky. Pomocí závitů G 3/8" jsou nátrubky přišroubovány k ventilu a k odpovídajícím otvorům v rozváděcí kostce.

**Rozváděcí kostka** je vyrobená z duralu a má rozměry 76 mm x 225 mm x 50 mm (délka x šířka x výška). V místě střetu otvorů z násypky s otvory z rozdělovače dochází k promíchání suspenze s vodou přivedenou z rozdělovače. Výsledná směs směřuje přímo do vstupních otvorů IVS. Pro připevnění nátrubek hadic jsou v otvorech z rozdělovače vyřezány závity G 3/8". Ostatní díry slouží k upevnění ke konstrukčním celkům (detail zapojení viz **Obr. 46**)



**Obr. 46** – Rozváděcí kostka

**IVS** má stejné rozměry jako ve skutečnosti. Je vyroben lepením z plexiskla tloušťky 5 mm. Víko je odnímatelné. Přepážky z plexiskla tloušťky 3 mm jsou odnímatelné a umožňují uvnitř IVS vytvořit libovolný labyrint. Vzájemné ustavení přesné polohy vstupních otvorů IVS a otvorů rozváděcí kostky je řešeno dvěma kolíky  $\Phi 6$  mm na stěně rozváděcí kostky, které odpovídají dvěma otvorům na čelní stěně IVS. Zajištění IVS proti pohybu je řešeno pryžovým a plastovým dorazem (viz **Přílohy**)

Na dně nádrže je umístěna **základová deska**, která slouží jako kotvicí prvek pro nosnou konstrukci násypek, rozváděcí kostky a IVS. Jedná se o plexisklo tloušťky 10 mm, jehož šířka odpovídá vnitřní šířce nádrže 480 mm a délka je 510 mm.

Nosná **konstrukce násypek** je vyrobena lepením z plastových desek tloušťky 10 mm. Součástí konstrukce je i závěsný oblouk pro zavěšení násypek (dvakrát ohnutý drát  $\Phi 8$  mm na koncích se závitem M6) a přišroubované patky pro jeho upevnění.

**Násypky** jsou v podstatě igelitové vaky v dolní části opatřené pryžovými hadičkami jimiž je vedena suspenze. Hadičky jsou vsunuty do trubic, které ústí do příslušných otvorů rozváděcí kostky.

Regulaci množství dodávané suspenze zajišťují akvarijní „škrťítka“ umístěná na jednotlivých hadičkách. Každému ze tří vstupních otvorů IVS odpovídá právě jedna násypka, regulační člen i přívodní trubice. Toto řešení umožňuje ovládání přívodu suspenze do jednotlivých otvorů IVS nezávisle na ostatních (na **Obr. 43** a **Obr. 44** nejsou násypky zobrazeny).

Návrh uvažuje pro potřeby experimentu použití uzavřeného okruhu s čerpadlem. Toto řešení klade důraz na kvalitu nasávané vody, což může být v průběhu experimentu problém. Experiment předpokládá obohacování vody o pevné částice, které mohou způsobit poškození pohyblivých částí. Na výstupu z nádrže je proto mezi výstupní příruby umístěn filtr v podobě jemné nerezové tkaniny.

Konstrukční řešení zařízení však umožňuje i zapojení v režimu, kdy je přívod vody řešen hadicí z vodovodního řadu a odtok znečištěné vody je veden do odpadní jímky – jedná se o ztrátový okruh. Voda v okruhu trvale necirkuluje a odpadá tak potřeba filtrovat odtékající kapalinu. Tento způsob řešení byl použit při realizaci experimentu v laboratořích VUT (viz **Obr. 47** až **Obr. 52**)

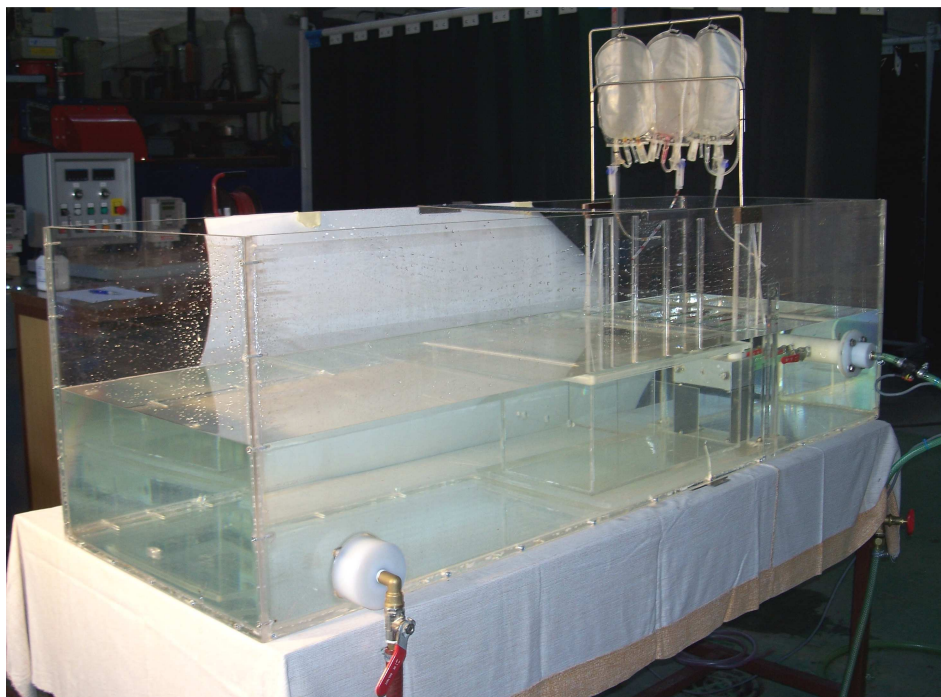
Průtok je měřen turbínkovým průtokoměrem s výstupem na digitální displej.

Těsnost nádrže a ostatních prvků je zajištěna silikonovým tmelem.

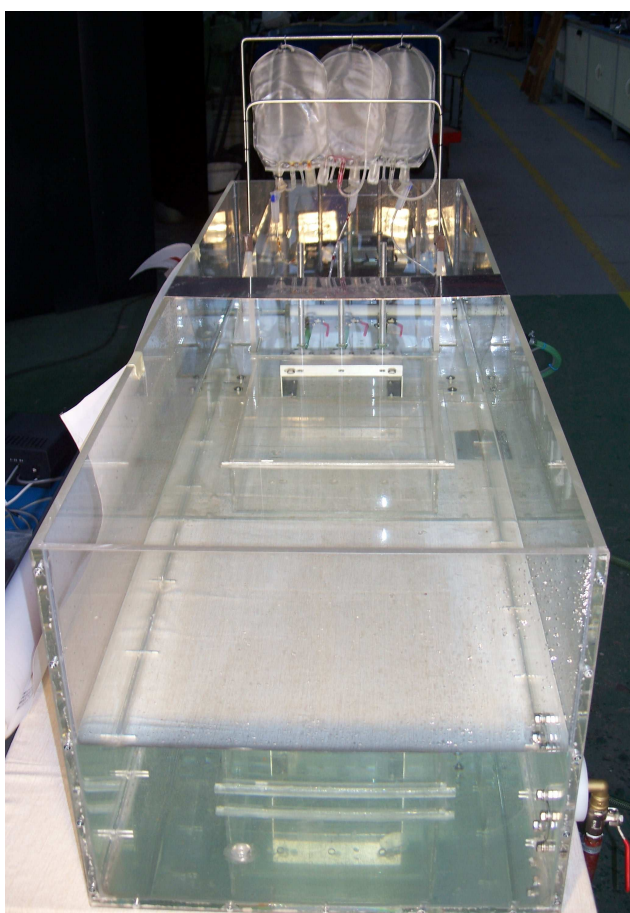
Umístění světlého pozadí za jednu z delších stěn nádrže vedlo ke zlepšení podmínek pro vizuální pozorování.



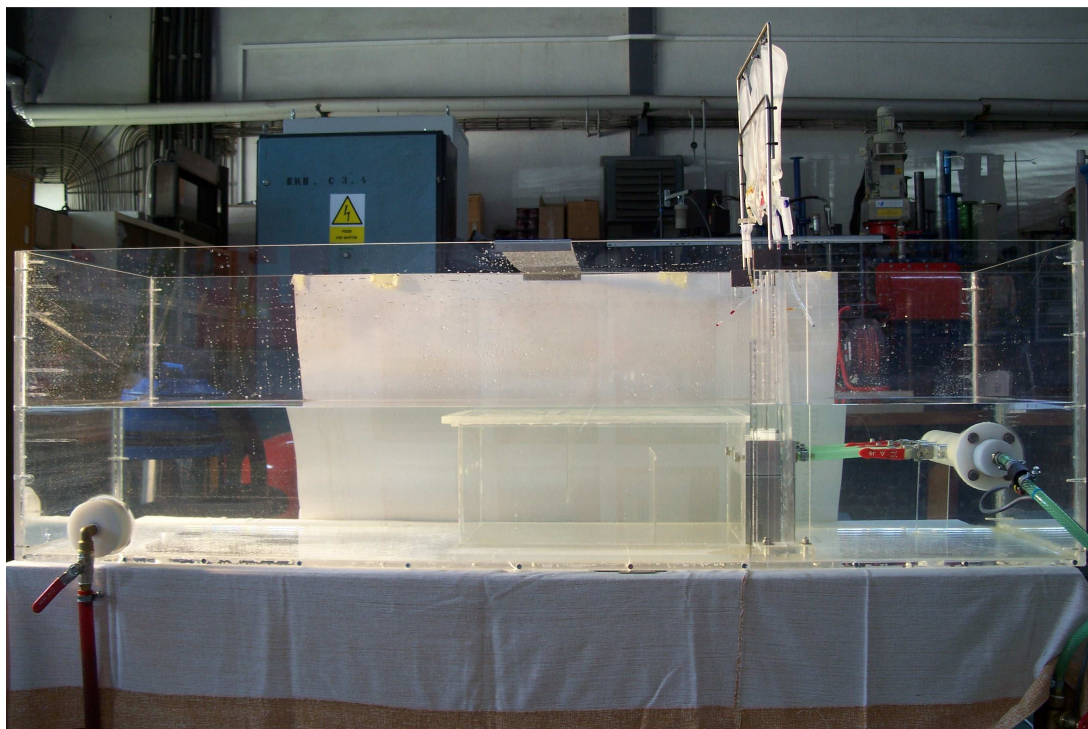
**Obr. 47 až 52** ukazují sestavený kompletní experimentální box



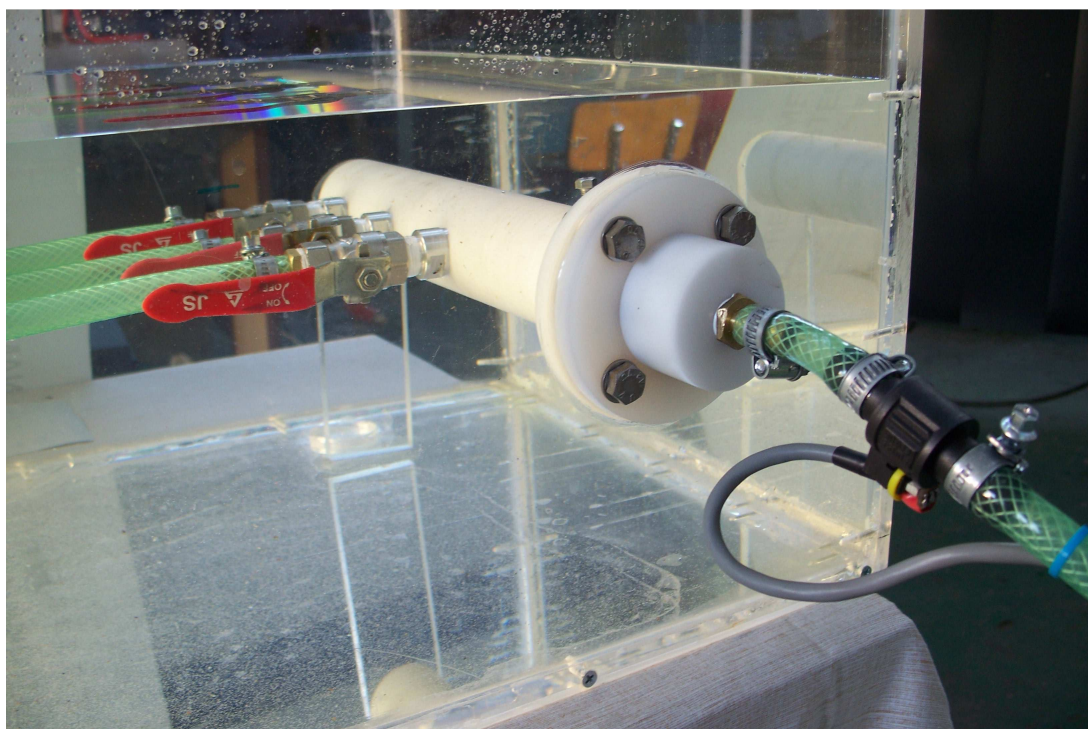
**Obr. 47** – Experimentální box. Celkový pohled



**Obr. 48** – Experimentální box. Pohled z boku



**Obr. 49** – Experimentální box. Pohled zepředu



**Obr. 50**– Experimentální box. Detail rozdělovače a zapojení turbínkového průtokoměru





**Obr. 51** – Experimentální box. Detail dávkování suspenze



**Obr. 52** – Experimentální box. Detail rozváděcí kostky. Napouštění – důkaz stejných průtoků

### Výhody experimentálního boxu:

- Jednoduchá konstrukce umožňující vizuální pozorování jevů v IVS
- Možnost nastavení různých vstupních rychlostí do IVS
- Možnost nezávislého ovládání průtoku vody i suspenze k jednotlivým otvorům
- Možnost zkoušení IVS různých rozměrů

## 4. Výpočtové modelování:

### 4.1. Matematický popis

Výpočetní modelování proudění znamená řešení soustavy diferenciálních rovnic přes výpočetní oblast tekutiny. Tato oblast je složena z výpočetních buněk, které dohromady tvoří výpočetní síť postihující celý vyšetřovaný objem tekutiny. Každá buňka představuje malou část tohoto objemu, přičemž každé buňce lze předepsat všechny diferenciální rovnice proudění:

- Rovnici kontinuity (zákon zachování hmotnosti) 1 rovnice
- Navier-Stokesovu rovnici (zákon zachování hybnosti) 3 složkové rovnice
- Rovnice turbulentního proudění min. 2 rovnice modelu turbulence

Rovnici kontinuity lze psát ve tvaru:

$$\operatorname{div} \vec{v} = 0 \quad (27)$$

Navier- Stokesova rovnice:

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \vec{v} \operatorname{grad} \vec{v} = -\frac{1}{\rho} \operatorname{grad} p + \nu \Delta \vec{v} + \vec{g} \quad (28)$$

kde:

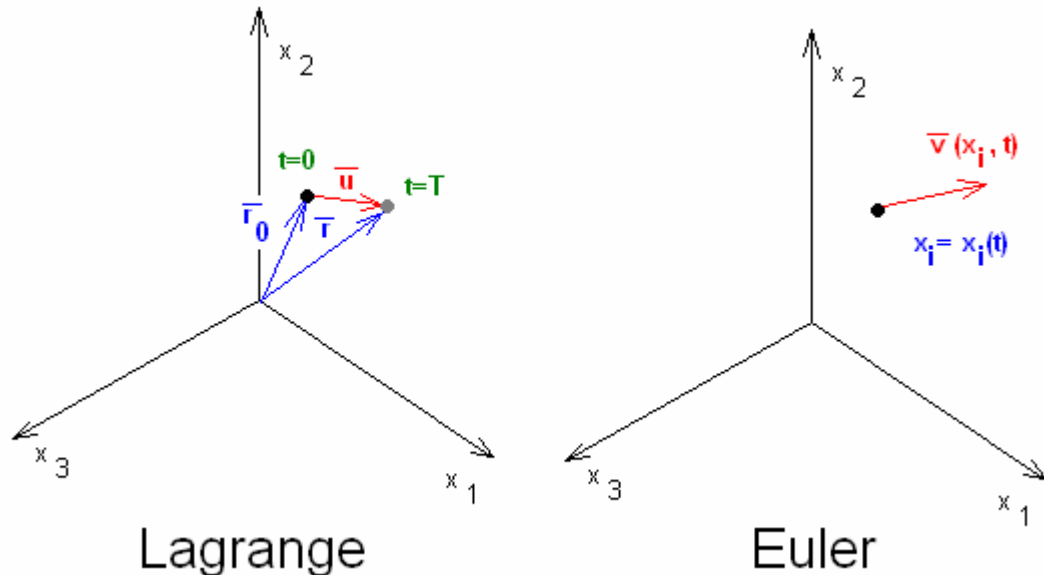
- $\vec{v}$  je vektor rychlosti proudění
- $p$  je tlak v [Pa]
- $\nu$  je kinematická viskozita vody v [m<sup>2</sup>/s]
- $\vec{g}$  je vektor tíhového zrychlení
- $\rho$  je hustota vody v [kg/m<sup>3</sup>]
- $t$  je čas v [s]

Počet rovnic pro řešení je dán součinem počtu buněk a počtu předepsaných diferenciálních rovnic. Software Fluent využívá pro řešení rovnic metodu konečných objemů (viz zdroj [18]). Obecně platí, že větší počet buněk znamená přesnější řešení, avšak vyžaduje větší výpočetní výkon.



Uvedené rovnice platí pro proudění jedné fáze.

Na **Obr. 53** jsou zobrazeny dva přístupy popisu proudění. Lagrangeův a Eulerův. Oba přístupy jsou správné, liší se pouze úhlem pohledu na kontinuum.



**Obr. 53** – Metody popisu kontinua

**Lagrangeův přístup** sleduje každou částici kontinua. Pohyb částice je uvažován v závislosti na původních (pevných) souřadnicích a na čase. Rychlost a zrychlení lze určit jako časové derivace polohy částice  $u$  :

Rychlost:

$$v_i = \frac{du_i}{dt} \quad (28)$$

Zrychlení:

$$a_i = \frac{dv_i}{dt} = \frac{d^2 u_i}{dt^2} \quad (29)$$

**Eulerův přístup** nesleduje konkrétní částice, ale sleduje veličiny jako pole v jednom zvoleném (pevném) bodě. Rychlost částice je třeba dopočítat z jiných rovnic, jelikož poloha částice je funkcí času. Časovou derivací polohy je dáno pouze lokální zrychlení. Celkové zrychlení se určí úpravou totálního diferenciálu rychlosti a lze psát ve tvaru:

$$a_i = \frac{dv_i}{dt} = \frac{\partial v_i}{\partial t} + \frac{\partial v_i}{\partial x_j} v_j \quad (30)$$

Lagrangeův přístup vyžaduje sledování každé částice kontinua, není proto vhodný pro vyšetřování proudění fází s velkým množstvím částic, jako např. kapalina nebo plyn, pro něž je vhodnější Eulerův přístup.

Software Fluent však umožňuje modelovat i **proudění více fází**. Výpočetní náročnost vícefázového proudění je však velmi značná, jelikož je nutné do výpočtu zahrnout diferenciální rovnice druhé, popř. dalších fází.

V případě řešení proudění v IVS připadá v úvahu kombinace proudění fází **kapalina – pevná fáze**. Veličiny každé fáze lze řešit oběma přístupy. Kapalná fáze je však řešena výhradě Eulerovým přístupem, pevnou fází je možné vyhodnocovat buď Eulerovým nebo Lagrangeovým přístupem. Volba vhodného přístupu záleží na objemovém podílu pevné fáze:

#### Euler-Eulerův přístup:

Obě fáze jsou modelovány Eulerovým přístupem a platí pro ně Navier-Stokesovy rovnice. Matematicky jsou obě fáze řešeny jako vzájemně prostupující kontinua, která se navzájem ovlivňují. Přenos hybnosti, hmoty a energie je možný mezi oběma fázemi. Model je vhodný pro proudění s větším, než 12% objemovým podílem pevné fáze.

#### Euler-Lagrangeův přístup:

Kapalná fáze je řešena jako kontinuum Navier-Stokesovými rovnicemi, rozptýlená fáze je řešena Lagrangeovým přístupem sledováním jednotlivých pevných částic. Lagrangeův model v softwaru Fluent neuvažuje vzájemnou interakci pevných částic ale přenos hybnosti, hmoty a energie ve smyslu kapalina → pevná fáze a naopak je možný. Za jeden časový okamžik je vypočteno rychlostního pole kapaliny, na základě kterého je spočtena hybnost rozptýlených pevných částic, která následně slouží jako zdrojový člen pro výpočet nového rychlostního pole kapaliny a proces se opakuje. Lagrangeův model je vhodný pro fáze jejichž objemový podíl je menší než 12%.

*„Pohyb pevných částic vychází z pohybové rovnice:*

$$\frac{d\vec{v}^p}{dt} = K_D (\vec{v} - \vec{v}^p) + \vec{g} \frac{\rho_p - \rho}{\rho_p} + \frac{\vec{F}}{\rho_p} \quad (31)$$

*Kde:*

$\vec{v}^p$  je vektor rychlosti pevné částice

$\vec{v}$  je rychlost kapaliny

$K_D$  je charakteristika odporu

$\rho_p$  je hustota pevné částice

$\rho$  je hustota kapaliny

$\vec{g}$  je tíhové zrychlení

$\vec{F}$  je další působící síly

Pro charakteristiku odporu  $K_D$  platí:

$$K_D = \frac{18\mu}{\rho_p d_p^2} \frac{C_D \text{Re}}{24} \quad (32)$$

Kde:

$\mu$  je dynamická viskozita kapaliny

$d_p$  je průměr pevné částice

Součinitel odporu kulové částice je určen ze vztahu Morsiho a Alexandra:

$$C_D = a_1 + \frac{a_2}{\text{Re}} + \frac{a_3}{\text{Re}^2} \quad (33)$$

kde konstanty  $a_1, a_2, a_3$  jsou funkcí Reynoldsova čísla pevné částice“

$$\text{Re} = \frac{\rho d_p |\vec{v} - \vec{v}_p|}{\mu} \quad (34)$$

[cit. 26.5. 2009] zdroj [7]

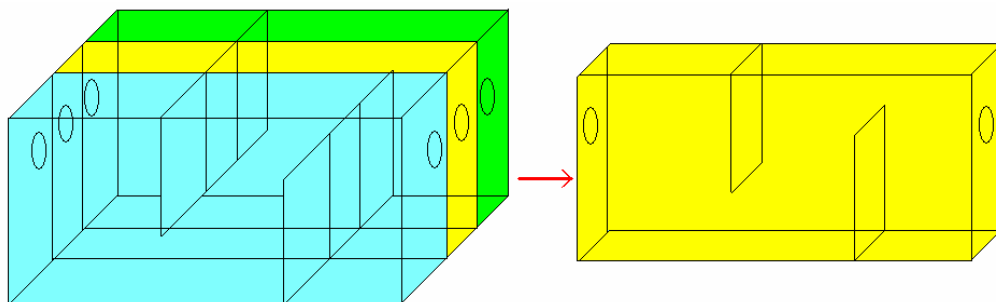
#### 4.2. Výpočtový model

Korektní výsledky CFD výpočtu je možné získat pouze správným nastavením výpočtového modelu, čímž se rozumí:

- kvalita výpočetní sítě
- nastavení okrajových podmínek
- nastavení počátečních podmínek
- nastavení řešiče a modelu proudění (laminární nebo turbulentní model)

Kvalitní výpočetní síť, která by postihovala celý vnitřní prostor IVS, by obsahovala více než 3 miliony výpočetních buněk. Pro řešení na běžném PC je takový počet buněk vysoký. Vzhledem k tomu, že je kromě modelování vlastního proudění kapaliny uvažováno i modelování proudění dvou fází by byl výpočet velmi časově náročný.

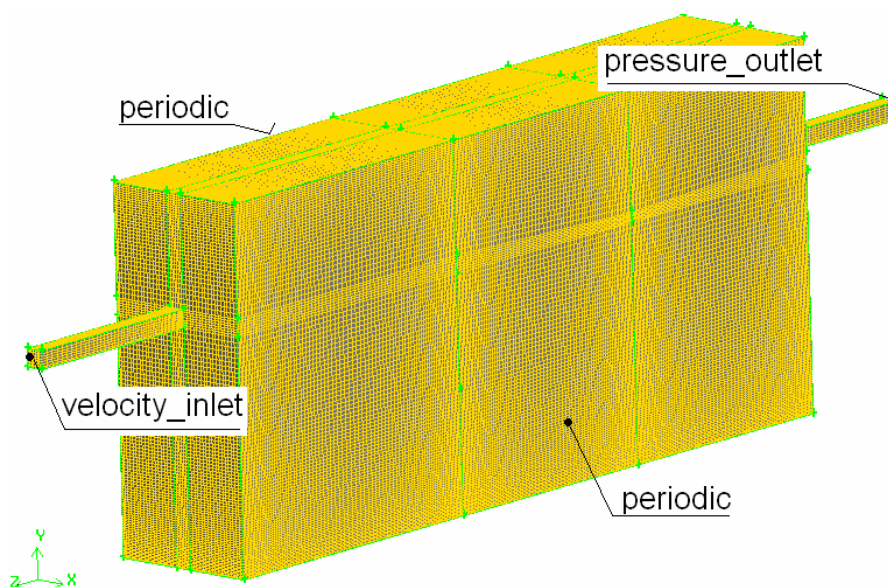
Došlo proto ke zjednodušení výpočetního modelu tak, že původní řešení IVS bylo podélně rozděleno na tři stejné části. Výpočetní síť byla vytvořena pouze na prostřední části (**Obr. 54**).



**Obr. 54** – Zjednodušení výpočetního modelu IVS

Zjednodušení výpočetní sítě je možné pouze v případě, že obě stěny vzniklé podélnými řezy budou mít po vytvoření výpočetní sítě stejný počet i tvar výpočetních buněk a jsou opatřeny okrajovou podmínkou PERIODIC. Podmínka říká, že za takto označenou plochou následuje naprosto totožná výpočetní oblast. Tímto způsobem je tedy modelován **IVS nekonečné šířky** s nekonečným počtem vstupních a výstupních otvorů k jehož řešení přitom stačí výpočetně modelovat proudění jen v jeho periodicky se opakující části.

Na **Obr. 55** je zobrazena výpočetní síť zjednodušeného modelu. Plochy, které nejsou na **Obr. 55** označeny okrajovými podmínkami mají okrajovou podmínku *wall*.



**Obr. 55** – Výpočetní síť a okrajové podmínky zjednodušeného modelu

Upravený tvar obsahuje asi 1 milion buněk. Síť byla konstruována tak, aby buňky měly tvar kvádru, nejlépe krychle, protože přesnost a rychlost výpočtu je dána také tvarem výpočetních buněk. Pravoúhlé stěny buněk činí výpočet přesnějším. Vstupní a výstupní otvor proto není kruhový, ale čtvercový. Jejich průřez odpovídá průřezu kruhového otvoru reálného vzorkovače ( $\Phi 10\text{mm}$ ).

Z **Obr. 55** je patrné, že směrem k přepážkám a u dna IVS, čili v místech očekávaných dějů a změn proudění, došlo k zahuštění výpočetní sítě. Smyslem tohoto řešení je rovněž zvýšení přesnosti výpočtu při zachování rozumného množství výpočetních buněk. Výpočetní síť zahrnuje také část oblasti před a za vzorkovačem v podobě vstupní a výstupní trubice ústící přímo do otvorů.

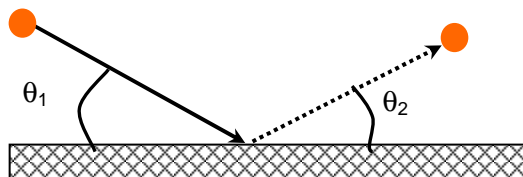
„Okrajové podmínky pro pevné částice předepisují jejich chování na hranicích výpočetní oblasti. Pro izotermický výpočet mají smysl jen 2 okrajové podmínky

a) *Escape*

Pokud částice dorazí na hranici, kde je definována tato okrajová podmínka, částice opouští výpočetní oblast. Podmínka escape se předepisuje např. na výstupu.

b) *Reflect*

Pokud částice narazí na hranici s okrajovou podmínkou reflect, dochází k odrazu.



**Obr. 56** – Okrajová podmínka reflect

[7]

Chování částice po odrazu lze nastavit tzv. koeficientem návratu dle následujících rovnic:

$$e_n = \frac{v_{2,n}}{v_{1,n}} \quad \text{rychlosti ve směru normálovém} \quad (35)$$

$$e_t = \frac{v_{2,t}}{v_{1,t}} \quad \text{rychlosti ve směru tangenciálním} \quad (36)$$

Koeficienty  $e_n$ ,  $e_t$  rovny 1 znamenají pružný odraz.“

[cit. 24. 5. 2009] zdroj [7]

Na všech stěnách s okrajovou podmínkou *wall* je pro pevné částice uvažována okrajová podmínka *reflect*. Usazování částic na dně IVS zhoršuje ostatním částicím možnost odrazu a volného pohybu po dně IVS, což popisují nízké koeficienty návratu pro dno IVS:

**Dno IVS:**  $e_n = 0,1$   $e_t = 0,5$

Na ostatních stěnách sice nedochází k usazování, avšak i zde je také uvažován nepružný odraz.

**Ostatní stěny IVS:**  $e_n = 0,75$   $e_t = 0,9$

Zvolené počáteční podmínky vycházejí ze zdroje [7]:

Vstupní rychlost kapaliny	0,2 m/s	(shodná se vstupní rychlostí pevné fáze)
Koncentrace pevné fáze	50 mg/l	
Hustota pevné fáze	2600 kg/m <sup>3</sup>	
Velikost částic	postupně 5μm, 50μm a 500μm	

Výpočet byl prováděn jako nestacionární s časovým krokem 0,5s

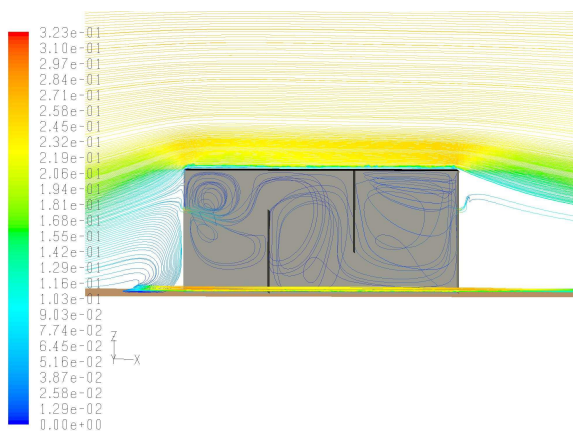
### 4.3. CFD výpočet

Předběžné výsledky výpočtu jednofázového proudění v IVS jsou uvedeny v literatuře [7]. Jednofázové proudění bylo modelováno různými modely proudění. Jelikož rychlosti proudění uvnitř IVS jsou velmi malé, nelze přesně vybrat správný model proudění.

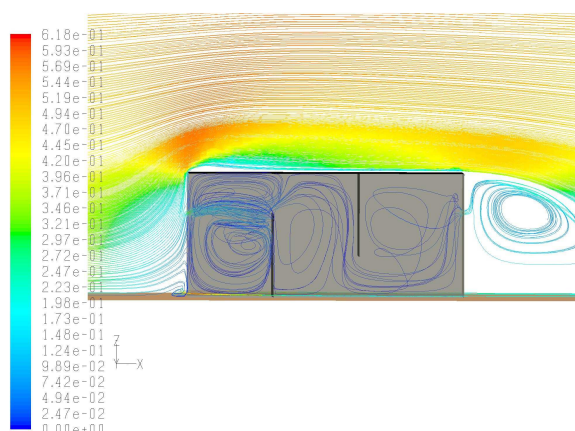
Výpočet byl proveden následujícími modely v programu Fluent:

- **Laminární model** – je určen pro proudění malými rychlostmi. Je výpočetně nejméně náročný, avšak neumožňuje zachytit turbulentní fluktuace, které mohou být významné pro přenos jemných pevných částic a pro jejich sedimentaci.
- **Turbulentní k- $\epsilon$  model** – je jeden z modelů určených pro modelování turbulentního proudění. Umožňuje zachytit náhodné fluktuace proudění. Model však nadhodnocuje disipaci, což zejména při malých rychlostech velmi zkresluje výsledky výpočtu.
- **LES** – z angl. Large Eddy Simulation, čili simulace velkých vírů. Model proudění na rozdíl od modelů turbulence nesimuluje fluktuace náhodně, ale velké víry jsou počítány přímo z Navier-Stokesových rovnic a pouze malé víry jsou počítány modelem turbulence. Tím je zaručena větší realističnost výpočtu. Nevýhodou je velká výpočtová náročnost.

Na **Obr. 57** a **58** jsou zobrazeny proudnice kapaliny při proudění podél vzorkovače, které je popsáno ve zdroji [7] a z něhož vycházejí vstupní hodnoty rychlosti do IVS pro další výpočty. Je jasně patrná deformace proudu v důsledku obtékání IVS, která vede ke snížení vstupní rychlosti. Závislost rychlosti proudění v řece a velikosti vstupní rychlosti viz **Tab. 4**.



**Obr. 58** – Vzorkovač v říčním korytě, vstupní rychlost 0,25 m/s. Proudnice [7]

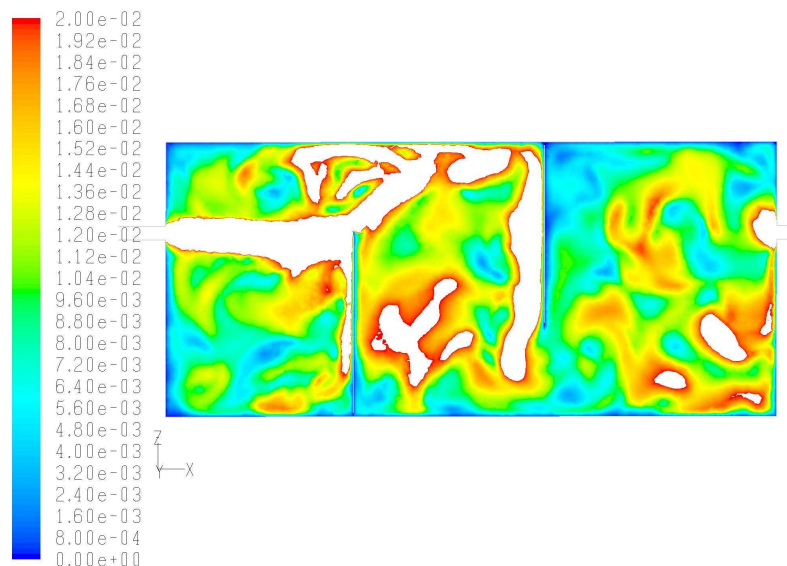


**Obr. 57** – Vzorkovač v říčním korytě, vstupní rychlost 0,5 m/s. Proudnice [7]

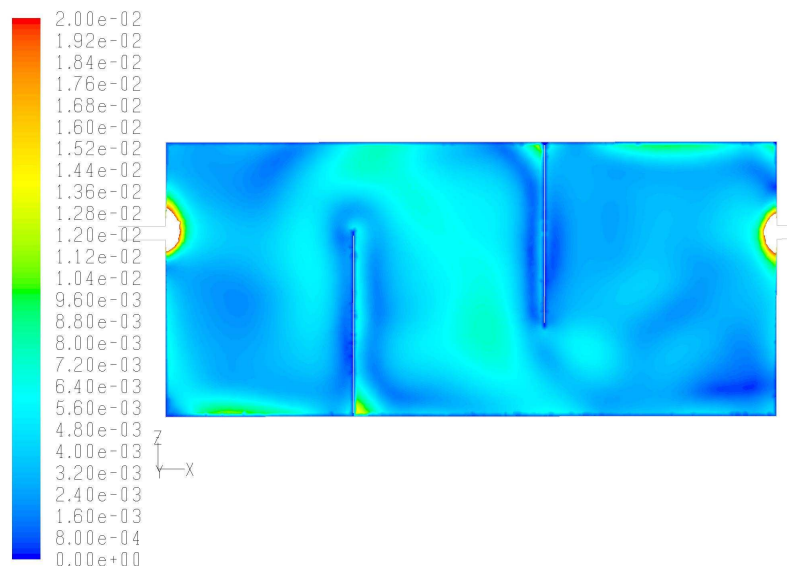


Následující obrázky ukazují výsledky výpočtu **jednofázového proudění** (vody) uvnitř IVS pro různé modely proudění (viz zdroj [7]):

### Pohled z boku:

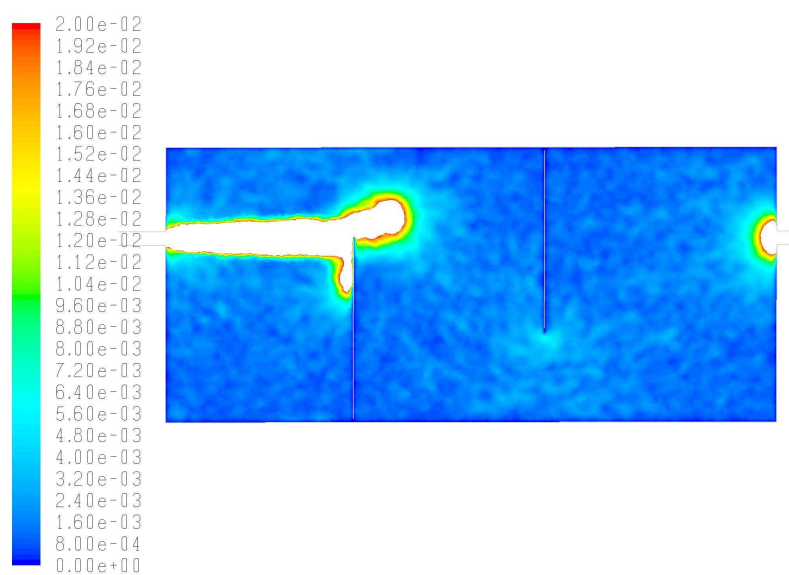


**Obr. 59** – Laminární model. Rychlost proudění. Vykreslení rychlosti proudění omezeno na 0,02 m/s  
[7]



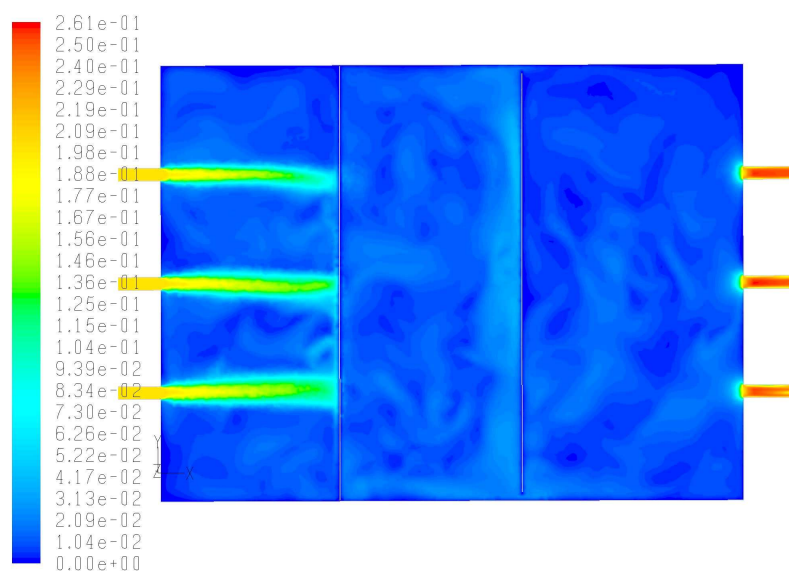
**Obr. 60** – Realizable  $k-\epsilon$  model turbulence. Rychlost proudění. Vykreslení rychlosti proudění omezeno na 0,02 m/s  
[7]



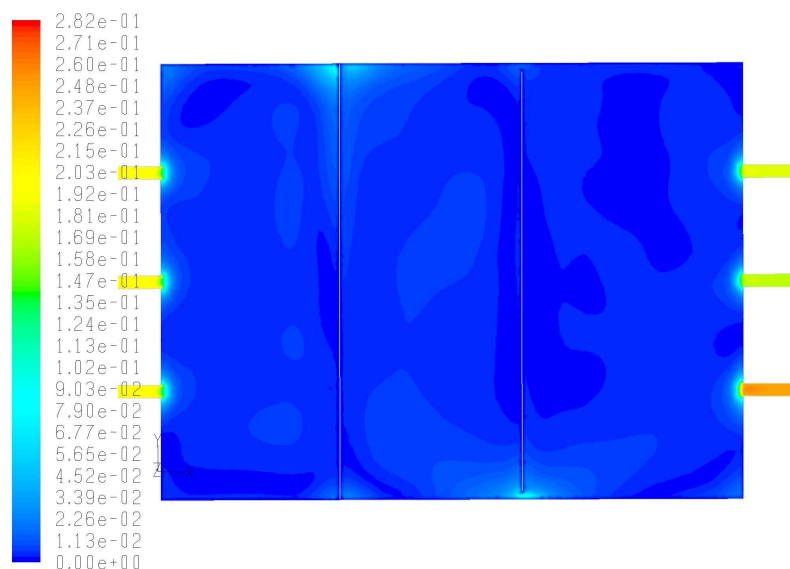


**Obr. 61** – LES. Rychlost proudění. Vykreslení rychlosti proudění omezeno na  $0,02 \text{ m/s}$   
[7]

### Pohled shora:

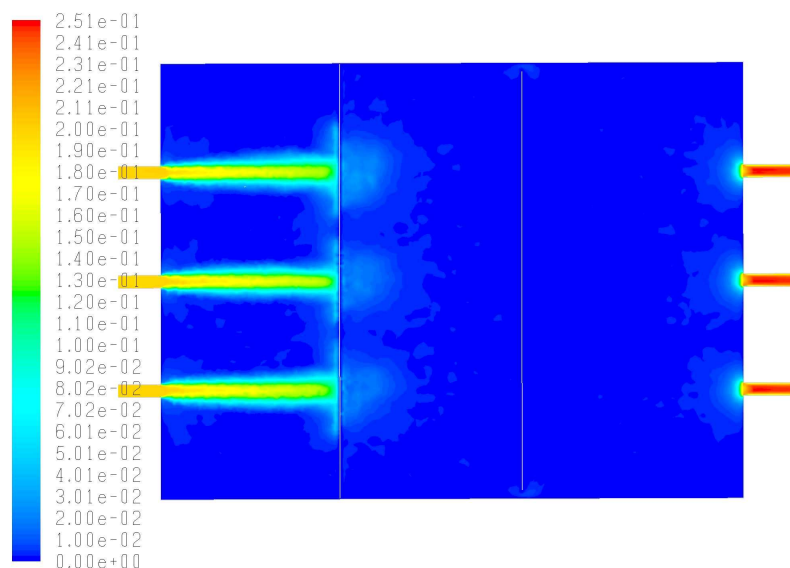


**Obr. 62** – Laminární proudění. Rychlost proudění.  
[7]



**Obr. 63** – Realizable  $k\text{-}\varepsilon$  model turbulence. Rychlost proudění.

[7]



**Obr. 64** – LES. Rychlost proudění.

[7]

Z obrázků je patrný značný rozdíl ve výsledcích výpočtu. LES metoda by měla být nejvíce realistická. Velice podobné výsledky je možné získat i laminárním modelem proudění. Naopak výsledky realizable  $k\text{-}\varepsilon$  modelu turbulence jsou od předchozích metod zcela odlišné.

Obecná představa o proudění uvnitř vzorkovače předpokládá, že proudové paprsky si po vstupu do IVS určitou dobu udrží svoji podobu a rozpadnou se až v určité vzdálenosti od vstupní stěny nebo při dopadu na hranu první přepážky. Tomuto tvrzení odpovídají pouze výsledky modelu laminárního proudění a LES.

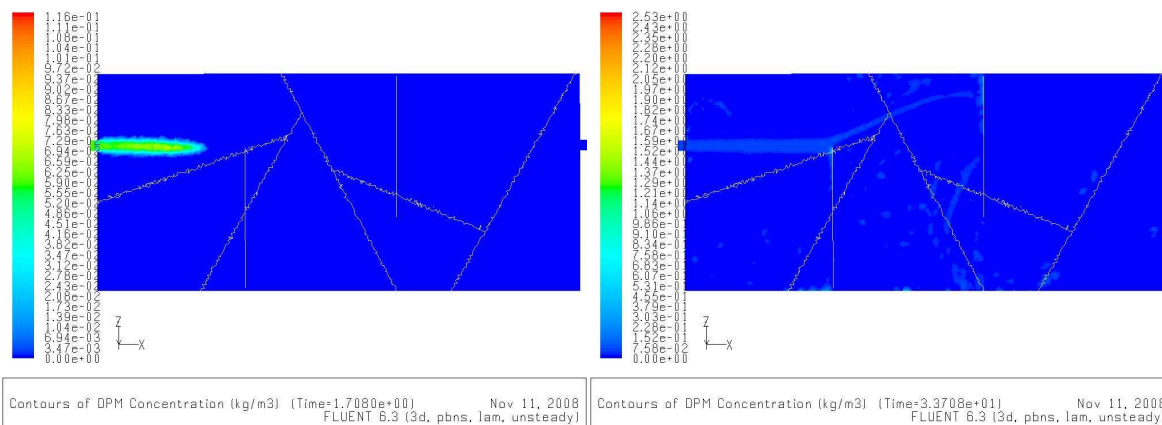
Pro výpočet vícefázového proudění byl vybrán **laminární model**. Model LES sice umožňuje přesnější výpočet, jeho výpočetní náročnost je však dána nejen větší složitostí modelu, ale i faktem, že iterace výpočtu je třeba provádět ve velmi malých časových intervalech – řádově 0,001 s. Z těchto důvodů nebyl výpočet metodou LES zvolen.

### Vícefázové proudění

Proudění bylo řešeno laminárním modelem jako nestacionární s časovým krokem 0,5s s uvažováním tří různých velikostí částic: 5 $\mu$ m, 50 $\mu$ m a 500 $\mu$ m

Na následujících obrázcích jsou zobrazeny koncentrace pevné fáze v kapalině

### Velikost částic 5 $\mu$ m



**Obr. 65** – Vícefázové proudění.

Laminární model.

Velikost částice 5 $\mu$ m. Čas 0,5s

[7]

**Obr. 66** – Vícefázové proudění.

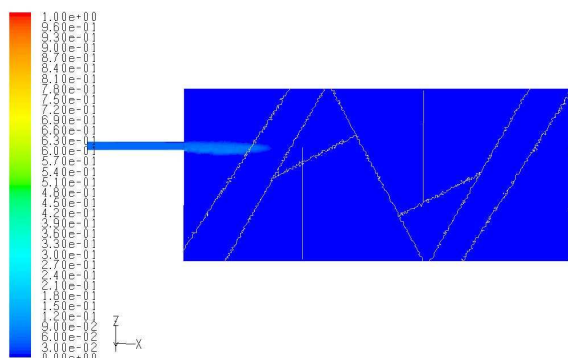
Laminární model.

Velikost částice 5 $\mu$ m. Čas 32s

[7]

*Pozn.: měřítko koncentrací na Obr. 65 a 66 není stejné.*

Částice velikosti 5 $\mu$ m v první fázi kopírují proudění kapaliny. Sedimentace nastává při poklesu rychlosti ve všech třech komorách IVS, některé částice opouštějí vzorkovač, aniž by se usadily.

Velikost částic 50 $\mu$ m

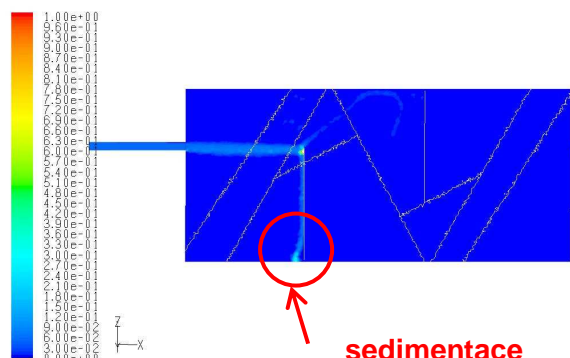
Contours of DPM Concentration (kg/m3) (Time=1.7080e+00) Nov 11, 2008  
FLUENT 6.3 (3d, pbns, lam, unsteady)

Obr. 67 – Vícefázové proudění.

Laminární model.

Velikost částice 50 $\mu$ m. Čas 0,5s

[7]



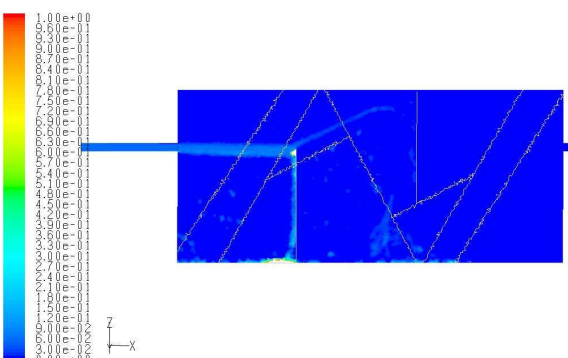
Contours of DPM Concentration (kg/m3) (Time=8.7080e+00) Nov 11, 2008  
FLUENT 6.3 (3d, pbns, lam, unsteady)

Obr. 68 – Vícefázové proudění.

Laminární model.

Velikost částice 50 $\mu$ m. Čas 7,5s

[7]



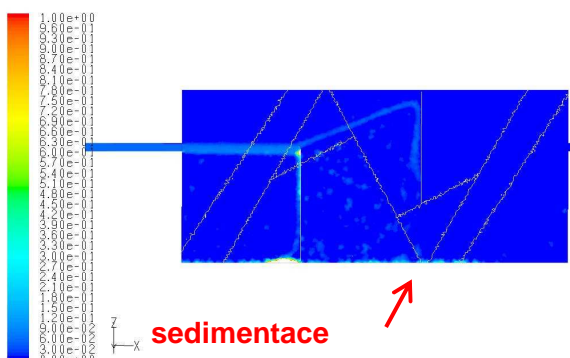
Contours of DPM Concentration (kg/m3) (Time=3.4708e+01) Nov 11, 2008  
FLUENT 6.3 (3d, pbns, lam, unsteady)

Obr. 69 – Vícefázové proudění.

Laminární model.

Velikost částice 50 $\mu$ m. Čas 33,5s

[7]



Contours of DPM Concentration (kg/m3) (Time=4.9708e+01) Nov 11, 2008  
FLUENT 6.3 (3d, pbns, lam, unsteady)

Obr. 70 – Vícefázové proudění.

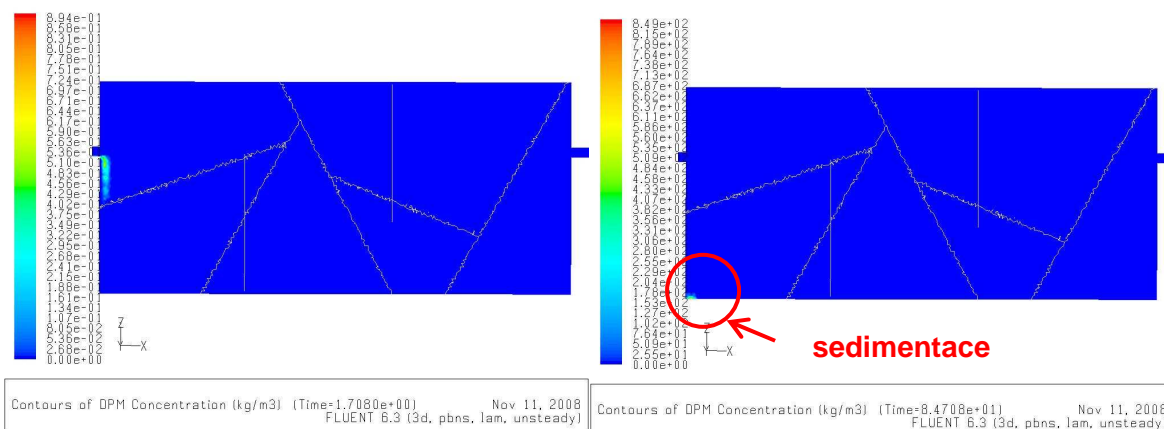
Laminární model.

Velikost částice 50 $\mu$ m. Čas 48,5s

[7]

Částice velikosti 50 $\mu$ m jsou zpočátku unášeny proudem kapaliny. Po střetu s hranou první přepážky a po rozdělení proudu dochází nejprve k sedimentaci v první komoře IVS. Jakmile proud dorazí do střední části, dojde k sedimentaci i v těchto místech. Částice, které opouštějí IVS, aniž by se usadily, jsou oproti částicím sedimentujícím v zanedbatelném množství.

### Velikost částic 500μm



**Obr. 71 – Vícefázové proudění.**

*Laminární model.*

Velikost částice **500μm**. Čas **0,5s**

[7]

**Obr. 72 – Vícefázové proudění.**

*Laminární model.*

Velikost částice **500μm**. Čas **83s**

[7]

Po vstupu do IVS částice velikosti 500μm ihned sedimentují. Jejich chování ve vzorkovači je proudovým polem kapaliny ovlivněno velmi málo.

## 5. Zhodnocení výsledků

Aby mohly být výsledky výpočetního modelování považovány za správné, je třeba tyto ověřit experimentem.

Experimentální zkouška proběhla na zkonstruovaném experimentálním boxu a zahrnuje ověření obrazu proudění a ověření proudění včetně pevné fáze.

### Postup průběhu experimentu:

1. Kalibrace různých poloh škrcení vývodu z násypek (tento postup byl proveden pouze před prvním experimentem)
2. Naplnění nádrže tak, aby byl IVS zcela zatopen
3. Nastavení průtoku čisté vody na požadovanou hodnotu
4. Nastavení velikosti škrcení suspenze na požadovanou hodnotu
5. Vpuštění proudu suspenze do proudu čisté vody

Jevy probíhající ve vzorkovači byly zaznamenány digitální videokamerou.

*Pozn.: při nastavování průtoku čisté vody je třeba vzít v úvahu i průtok suspenze, který je dodáván z násypek, aby bylo zachováno množství směsi vstupující do IVS.*

*Nastavený průtok je proto:*

$$Q_N = Q - Q_S \quad (37)$$



kde

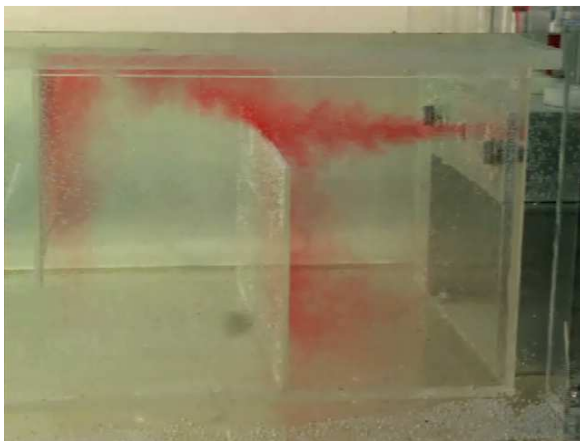
$Q_N$  je nastavovaný průtok čisté vody

$Q$  je celkový průtok určený z rychlosti na vstupu do IVS (viz **Tab. 4**)

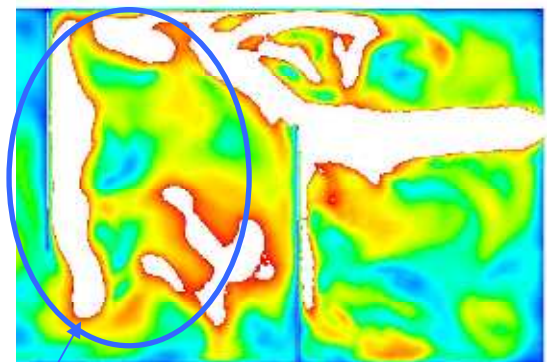
$Q_S$  je celkový průtok suspenze

### Jednofázové proudění:

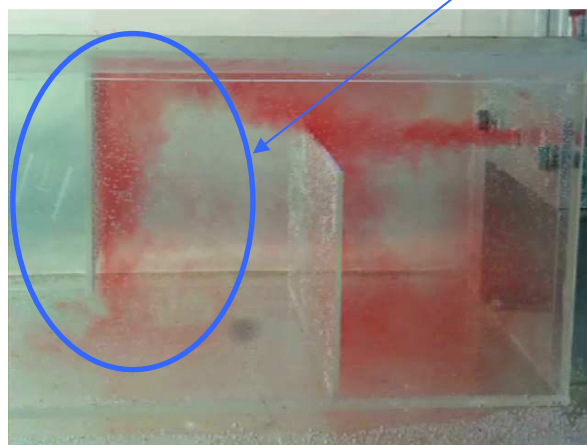
Během experimentu ověřujícím obraz proudění v IVS nebyla přidávána suspenze pevných částic. Násypky byly naplněny vodou, jež byla obarvena potravinářským barvivem. Nejprve bylo barvivo přidáváno jen do proudu prostředního otvoru. V dalším experimentu bylo v každé násypce barvivo rozdílné barvy. V průběhu experimentu tak bylo možné sledovat příspěvky jednotlivých násypek do celkového dění v IVS. Přívod vody je zprava.



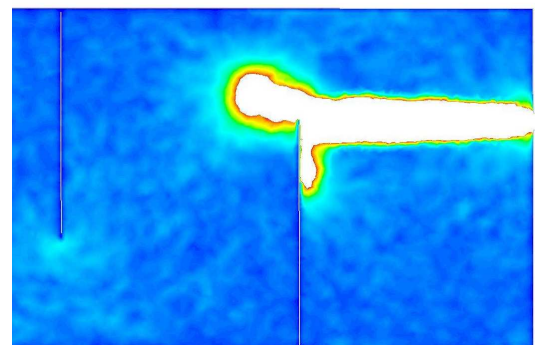
**Obr. 73** – Jednofázové proudění. Prostřední proud obarven.  
Čas experimentu 10s



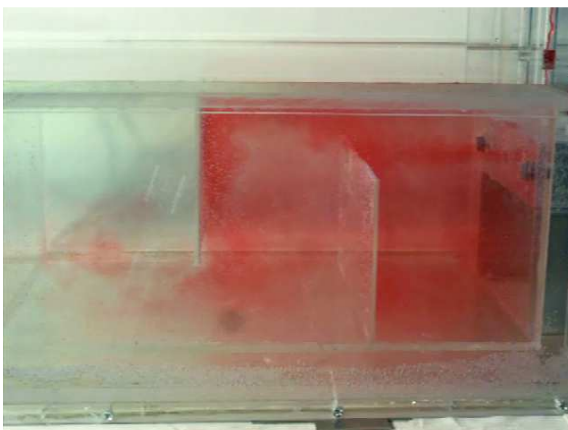
**Obr. 74** – Jednofázové proudění. Porovnání s CFD výpočtem laminárním prouděním.  
Výřez z Obr. 59



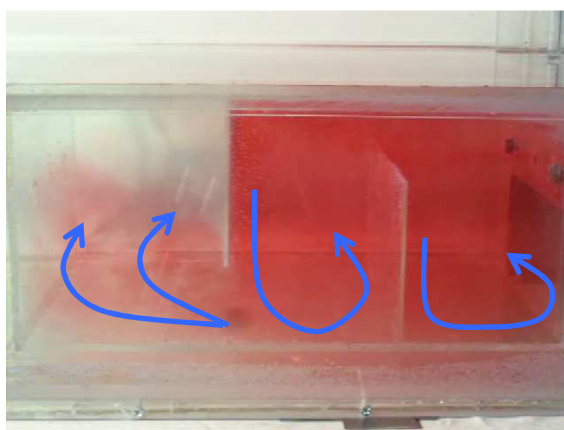
**Obr. 75** – Jednofázové proudění. Prostřední proud obarven.  
Čas experimentu 20s



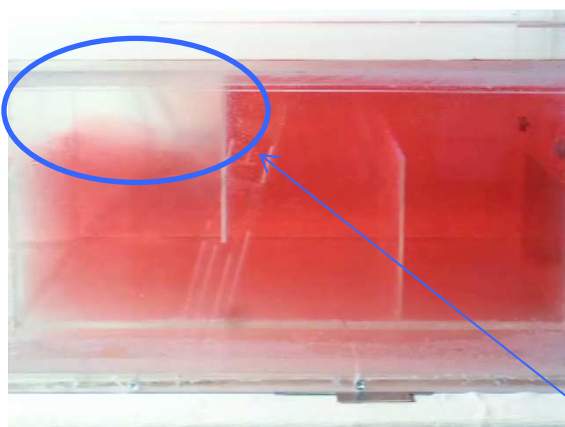
**Obr. 76** – Jednofázové proudění. Porovnání s CFD výpočtem LES.  
Výřez z Obr. 61



**Obr. 78** – Jednofázové proudění. Prostřední proud obarven.  
Čas experimentu 40s



**Obr. 77** – Jednofázové proudění. Prostřední proud obarven.  
Čas experimentu 65s



**Obr. 79** – Jednofázové proudění. Prostřední proud obarven.  
Čas experimentu 163s

Podmínky experimentu:

$$Q_N = 51,2 \text{ ml/s}$$

$$Q_S = 1 \times 1,8 \text{ ml/s (pouze prostřední násypka)}$$

Odpovídá rychlosti proudění asi **0,22 m/s** na vstupu do IVS

**Nejmenší koncentrace**

Paprsek proudu kapaliny se po vstupu do vzorkovače rozšiřuje. Při střetu s hranou první přepážky dochází k rozpadu tohoto paprsku. Větší část přitékaného objemu pokračuje do střední části vzorkovače, kde dochází ke stékání proudu po druhé přepážce. V prvním prostoru je menší část proudu je první přepážkou vedena ke dnu IVS, kde dochází k víření.

Rychlost stékání po stěně přepážky ve střední části je odhadem poloviční oproti rychlosti těsně před střetem paprsku s první přepážkou. Jakmile paprsek ve střední části dorazí na dno vzorkovače, vrací se po dně zpět proti původnímu směru proudění a cirkuluje ve středním prostoru vzorkovače omezeném oběma přepážkami (**Obr. 77 a Obr. 78**).



Pouze malá část objemu je unášena do třetího (posledního) prostoru. Zde také dochází k zavírání – pravděpodobně vlivem rozšíření po zúžení průtočného prostoru mezi dnem a přepážkou, v němž dojde k nárůstu rychlosti. Rychlosti proudění v poslední části IVS jsou velmi malé.

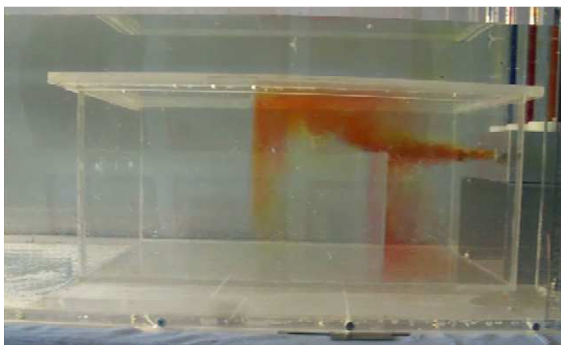
Na **Obr. 77** až **79** je vidět, že největší podíl barviva je zpočátku soustředěn v prvním a druhém (tj. středním) prostoru IVS, zatímco místo, s nejmenším podílem barviva se nachází v posledním prostoru těsně u víka.

Ke kompletnímu zaplnění prostoru IVS při uvedených podmínkách experimentu nedošlo ani po **720 s**, kdy byl experiment ukončen. Při velmi malých rychlostech proudění v poslední části vzorkovače může být podstatný vliv rozdílné hustoty přidaného barviva a čisté vody. Obtížné zaplnění celého prostoru může být způsobeno i touto skutečností.

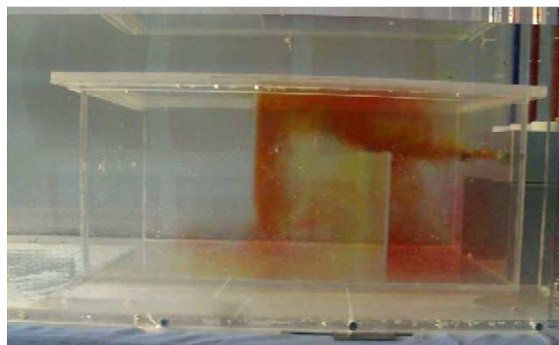
Z **Obr. 73** až **79** je možné vypožorovat, že laminární model velmi dobře sleduje skutečné děje uvnitř vzorkovače. Na rozdíl od LES modelu laminární model zachytil stékání proudu po obou přepážkách i další vířivé jevy vyskytující se u víka IVS.

Obrázek LES modelu ukazuje situaci v jednom okamžiku, víry však mohou vznikat a zanikat, zatímco laminární model zobrazuje střední hodnoty obrazu proudění. Je tedy možné, že výsledky simulace pomocí LES budou velmi blízké laminárnímu modelu.

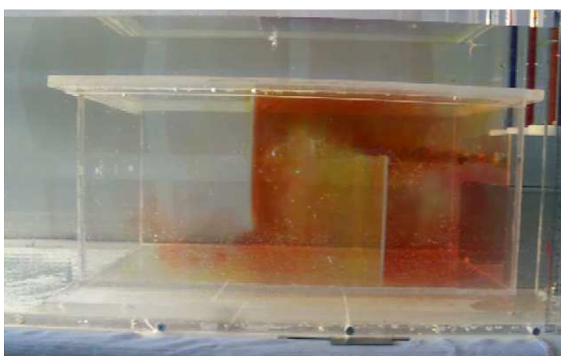
Následující experiment probíhal podobně. Barvivo však bylo přidáváno do proudu všech tří otvorů:



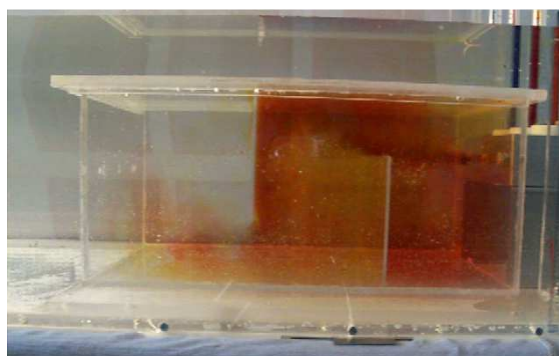
**Obr. 80** – Jednofázové proudění. Proudý obarveny.  
Čas experimentu 10s



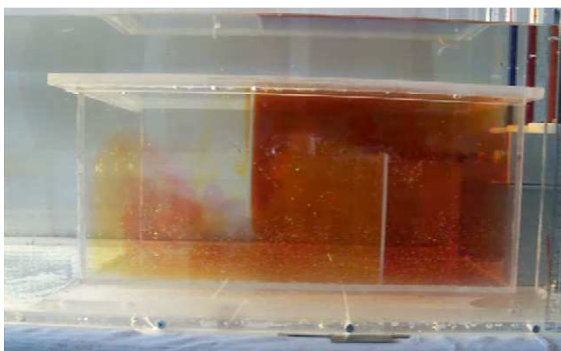
**Obr. 81** – Jednofázové proudění. Proudý obarveny.  
Čas experimentu 20s



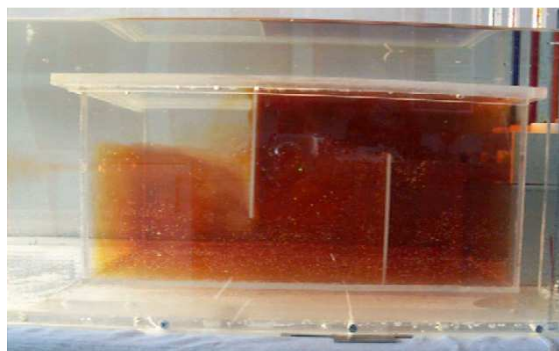
**Obr. 82** – Jednofázové proudění. Proudý obarveny.  
Čas experimentu 30s



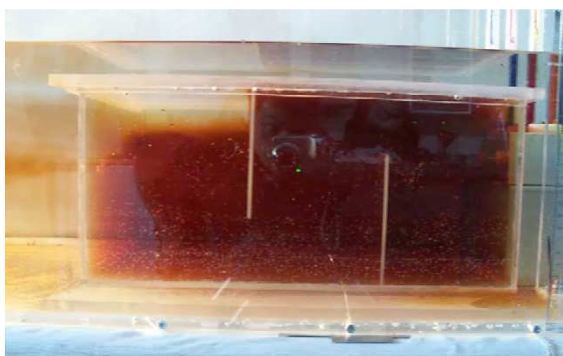
**Obr. 83** – Jednofázové proudění. Proudý obarveny.  
Čas experimentu 40s



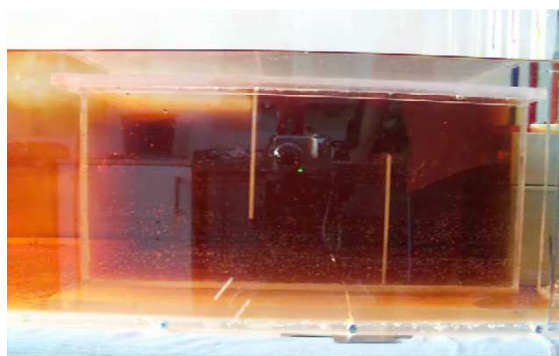
**Obr. 84** – Jednofázové proudění. Proudý obarveny.  
Čas experimentu 65s



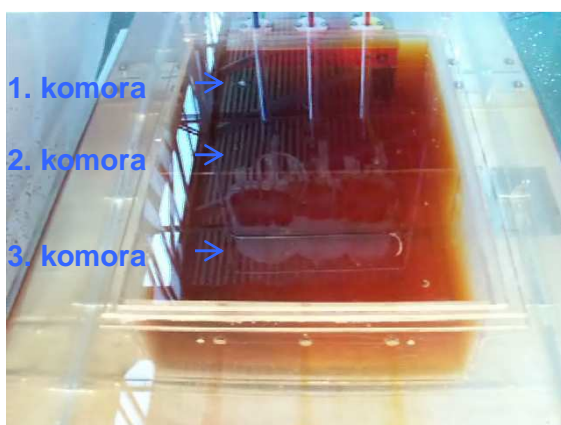
**Obr. 85** – Jednofázové proudění. Proudý obarveny.  
Čas experimentu 120s



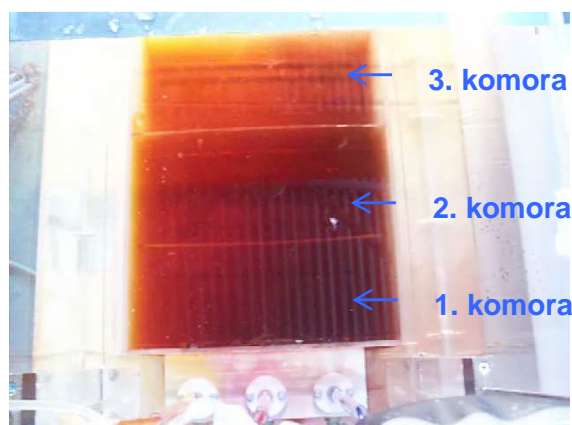
**Obr. 88** – Jednofázové proudění. Proudý obarvený.  
Čas experimentu **360s**



**Obr. 89** – Jednofázové proudění. Proudý obarvený.  
Čas experimentu **600s**



**Obr. 86** – Jednofázové proudění. Proudý obarvený.  
Pohled na zadní stěnu  
Čas experimentu **283s**



**Obr. 87** – Jednofázové proudění. Proudý obarvený.  
Pohled shora  
Čas experimentu **311s**

Podmínky experimentu:

$$Q_N = 52 \text{ ml/s}$$

$$Q_S = 3 \times 1,8 \text{ ml/s (všechny tři násypky)}$$

Odpovídá rychlosti proudění asi **0,22 m/s** na vstupu do IVS

Experiment probíhal za téměř stejných podmínek, jako předchozí pokus a je vidět, že výsledky jsou velice podobné. Místem, kam barvivo doputuje nejpozději zůstává horní část poslední komory.

**Obr. 88** a **Obr. 89** byly pořízeny pro ilustraci vzájemného promíchání barviv uvnitř IVS. Pro **Obr. 88** platí, že nejtmaší barvou – modrou – byl obarven levý otvor, prostředním otvorem protékala barva červená a pravým otvorem žlutá. Na **Obr. 89** je pořadí barev opačné.

V první části IVS je vidět výrazný rozdíl, mezi sytostí zabarvení na levé a pravé straně. Postupem proudu přes 2. komoru do poslední (třetí) části je možné pozorovat vzájemné promíchání barevných příspěvků jednotlivých otvorů, což je jasný důkaz vířivých jevů nejen ve vertikálním, ale i v horizontálním směru. Přesto lze z **Obr. 88** jasně rozlišit barevný rozdíl vystupujících paprsků. Promíchání vstupních paprsků tedy není vířivostí dostatečně zajištěno.

### Vícefázové proudění:

Experiment zahrnuje simulaci proudění vody a suspenze (voda+pevné částice). Ve spolupráci s Českou geologickou službou byla připravena suspenze, která vznikla rozmícháním zeminy v množství čisté vody. Aby pevné částice suspenze zůstaly v násypkách ve vzhledu po celou dobu trvání experimentu, bylo rozmíchání zajištěno ultrazvukovým míchačem. Dle dostupných informací je možné tímto způsobem zabezpečit dostatečný vzhled částic v řádech hodin, což potřebám experimentu zcela vyhovuje.

Velikost částic v suspenzi byla asi 1  $\mu\text{m}$  až 30  $\mu\text{m}$ . Koncentraci pevných částic v suspenzi se nepodařilo určit.

Před vlastním experimentem byla provedena kalibrace škrtících prvků, pro dávkování suspenze. Kalibrací bylo zjištěno, že při nastavení velmi malých hodnot průtoků suspenze ( $\approx 1\text{ml/s}$ ) může docházet k ucpání škrtících prvků. Nastavením vyšších hodnot průtoků suspenze bylo ucpávání odstraněno.

Podmínky experimentu:

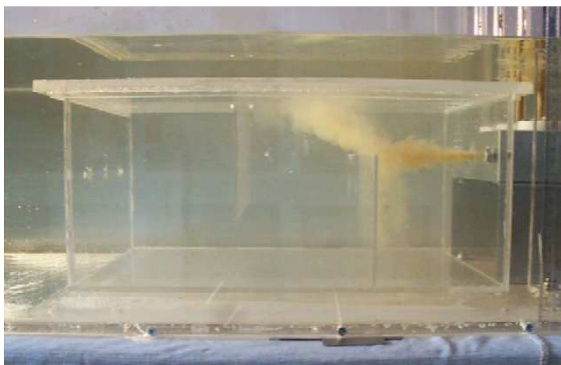
$$Q_N = 67 \text{ ml/s}$$

$$Q_S = 3 \times 6 \text{ ml/s (všechny tři násypky)}$$

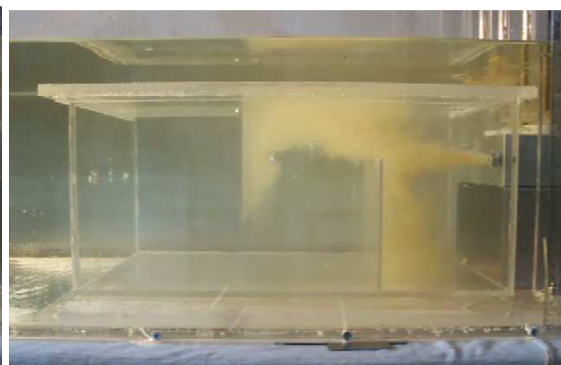
Odpovídá rychlosti proudění asi **0,3 m/s** na vstupu do IVS.

Následující obrázky ukazují průběh experimentu



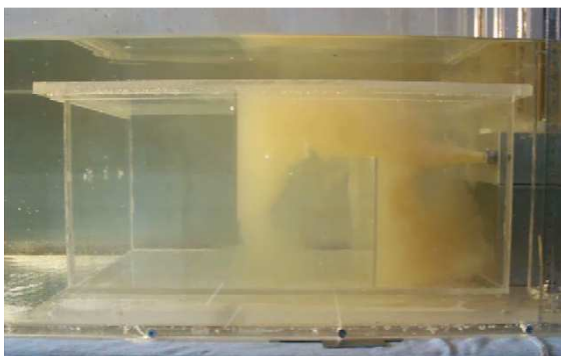


**Obr. 90** – Dvofázové proudění.  
Čas experimentu 3s

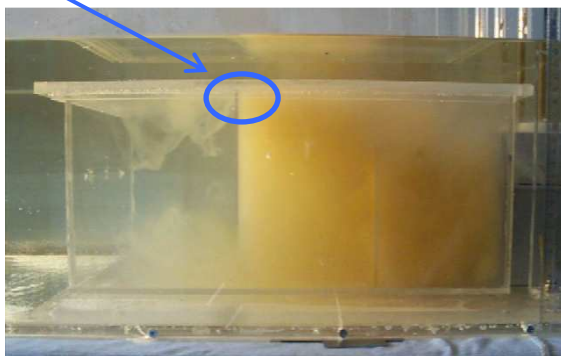


**Obr. 91** – Dvofázové proudění.  
Čas experimentu 6s

netěsnost

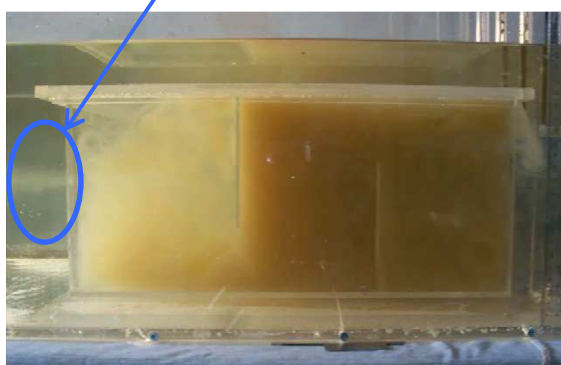


**Obr. 92** – Dvofázové proudění.  
Čas experimentu 10s

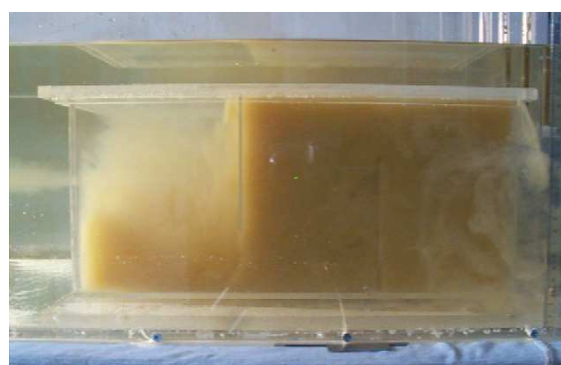


**Obr. 93** – Dvofázové proudění.  
Čas experimentu 20s

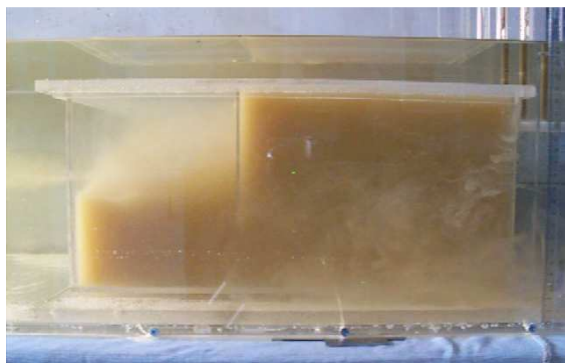
neusazené částice



**Obr. 94** – Dvofázové proudění.  
Čas experimentu 40s



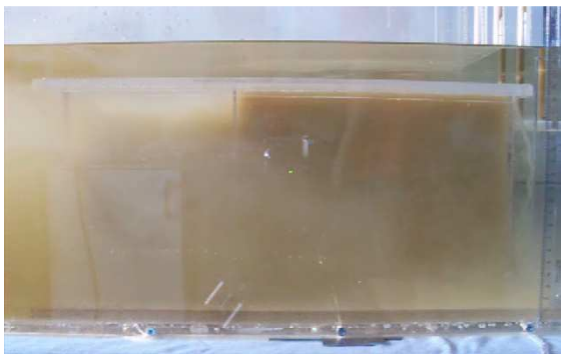
**Obr. 95** – Dvofázové proudění.  
Čas experimentu 60s



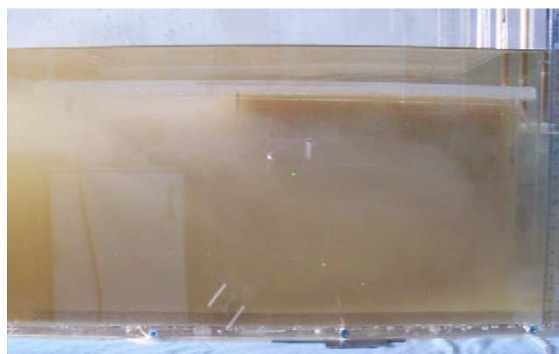
**Obr. 97** – Dvoufázové proudění.  
Čas experimentu **100s**



**Obr. 96** – Dvoufázové proudění.  
Čas experimentu **180s**



**Obr. 100** – Dvoufázové proudění.  
Čas experimentu **280s**



**Obr. 101** – Dvoufázové proudění.  
Čas experimentu **300s**



**Obr. 99** – Dvoufázové proudění.  
1. a 2. komora. Pohled shora  
Čas experimentu **410s**



**Obr. 98** – Dvoufázové proudění.  
1. a 2. komora. Pohled shora  
Čas experimentu **470s**

Experiment byl ukončen asi po **600s**. Suspenze byla do vstupního proudu přidávána po celou dobu trvání experimentu. Dokonalou těsnost druhé přepážky vůči víku se nepodařilo zajistit. Část suspenze pronikla touto netěsností do třetí komory (**Obr. 93**). Vliv netěsnosti na chování suspenze v prostoru vzorkovače byl však zanedbatelný a netěsnost byla považována za bezpředmětnou.

Na **Obr. 94** je možné pozorovat neusazené částice opouštějící IVS. Pravděpodobně se jedná o nejmenější částičky suspenze ( $\approx 1$  až  $10 \mu\text{m}$ ), což potvrzuje výsledky CFD výpočtu.

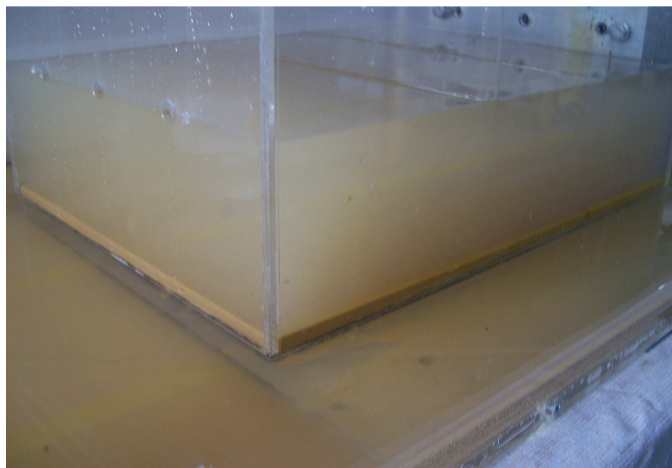
**Obr. 100 a 101**, které shora zobrazují detail první a druhé komory vzorkovače během experimentu, dokumentují vznik a zánik vírů. Koutové víry (viz **Obr. 100**) a víry v prostoru těsně za vstupem do IVS, již nejsou na **Obr. 101** zachyceny. Fotografie byly pořízeny v rozmezí 60-ti sekund a jsou důkazem neustáleného proudění v první a druhé komoře IVS. Ve třetí (poslední) komoře nebyla takto výrazná vířivost zaznamenána.

Vlivem neusazených částic postupně docházelo k znečišťování okolní vody v nádrži (**Obr. 98 a 99**). Aby bylo možné vizuálně posoudit míru sedimentace ve vzorkovači došlo ihned po ukončení experimentu (tj. po zastavení přívodu vody i suspenze) k rychlému vyprázdnění objemu nádrže.

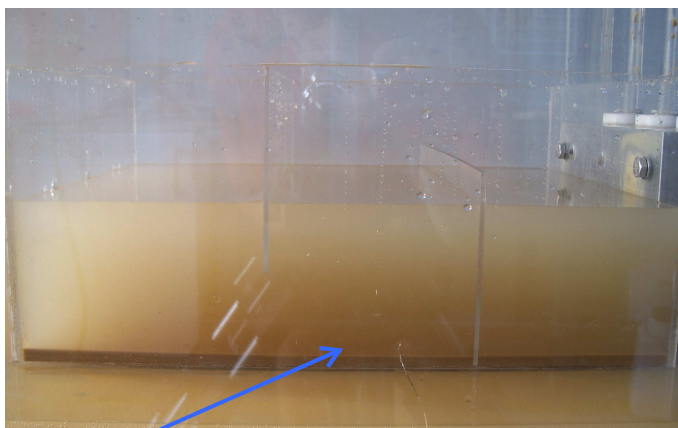
Sedimentující částice vytvořily v celém prostoru IVS souvislou vrstvu o výšce asi 10 mm (**Obr. 102 a 103**).

Nebyla pozorována snaha o sedimentaci jen v určitém místě.

Nepatrné zúžení výšky sedimentu bylo zaznamenáno ve střední části IVS, pravděpodobně jako následek rotace proudu mezi přepážkami (**Obr. 103**)



**Obr. 102** – Dvoufázové proudění.  
Posouzení sedimentace



**zúžení výšky sedimentu**

**Obr. 103** – Dvoufázové proudění.  
Posouzení sedimentace



## 6. Závěr

Experimentální ověření proudění uvnitř integrálního vzorkovače sedimentu umožnilo lépe porozumět jevům, které se zde odehrávají. Konstrukční řešení experimentálního boxu se ukázalo jako velmi vhodné a potřebám experimentu plně vyhovuje.

Výsledky simulace **jednofázového proudění** vedly k nalezení optimálního výpočtového CFD modelu. Vznik a zánik vírů patrný v průběhu experimentu virtuálně nevěrněji popisuje model LES. Laminární model proudění sice zobrazuje časově střední hodnoty počítaných veličin, ale porovnáním výsledků lze nalézt velice dobrou shodu mezi skutečným (experimentálním) obrazem proudění a CFD výpočtem.

CFD řešení metodou LES je doporučeno. Laminární model proudění lze využít jako alternativu, není-li k dispozici dostatečný výpočetní výkon. Použití modelů turbulence není doporučeno.

Výpočtové modelování **dvoufázového proudění** bylo řešeno laminárním modelem. Vytvoření rovnoměrné vrstvy sedimentu na dně IVS pro částice s velikostí do 50  $\mu\text{m}$ , stejně jako opouštění prostoru IVS pro částice s velikostí  $\approx 5\mu\text{m}$  bylo zjištěno jako experimentem, tak CDF výpočtem. Vzhledem k tomu, že se nepodařilo určit koncentraci pevných částic v suspenzi, nemohlo být kvantitativní porovnání provedeno. Lze předpokládat, že velmi významný vliv na správnost CFD výpočtu při kvantitativním sledování bude mít nastavení koeficientů návratu u okrajové podmínky *reflect*.

Pro kvalitativní srovnání výpočetní model vyhovuje.

Při obecné analýze proudění uvnitř IVS byl zjištěn rozpad vstupních paprsků po narázu na hranu první přepážky, což vede k rozdělení proudu. Část proudu je vedena první přepážkou ke dnu IVS, kde dochází k vytvoření víru. Druhá část proudu směřuje šikmo vzhůru a po dopadu na druhou přepážku je proud ve střední části veden směrem ke dnu IVS. I zde nastává vytvoření víru. Oba víry mají shodný smysl rotace, která je obrácená proti smyslu otáčení hodinových ručiček. Při dopadu proudu ve střední části na dno IVS dojde k dalšímu rozdělení proudu. Větší část proudu je vírem stržena zpět do střední části, menší část pokračuje do poslední komory, přičemž i tento jev je doprovázen vznikem víru. Smysl rotace víru ve třetí komoře je opačný oproti prvním dvěma vírům a na obrázcích odpovídá smyslu otáčení hodinových ručiček. Nejprve tedy nastává zaplnění první a druhé komory vzorkovače, kde je možné pozorovat vysoký nárůst koncentrace pevných částic. Plnění poslední komory pevnými částicemi probíhá velmi pomalu, což je důkaz nízkých rychlostí proudění.

Vznik vírů je možné pozorovat i při pohledu shora. Tyto víry mají nahodilý charakter a jejich chování nelze zobecnit.

## 7. Doporučení pro další výzkum

Další výzkum IVS by se měl zaměřit zejména na:

### 1. Nastavení výpočtového modelu pro kvantitativní hodnocení sedimentace:

- Experimentem ověřit chování částecek různých velikostí při kontaktu se stěnami a dnem IVS a závěry využít pro nastavení koeficientů návratů u okrajové podmínky *reflect*.
- Experimentem ověřit míru sedimentace pro různé velikosti částic a porovnat s CFD výpočtem.
- Experimentem ověřit míru sedimentace pro vybranou velikost částic za daný časový okamžik a porovnat s CFD výpočtem.

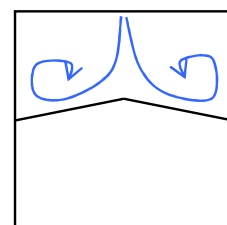
### 2. Optimalizaci geometrie vlastního tvaru IVS:

- Upravit výšku první přepážky vůči vstupním otvorům tak, aby nedocházelo k rozdělení proudu po dopadu na její hranu a prodloužit tím dobu setrvání částice v IVS
- Ověřit pořadí, počet a vzájemné vzdálenosti přepážek a jejich vliv a proces sedimentace v IVS. Např. záměnou vstupu a výstupu IVS (**Obr. 104**)



**Obr. 104** – Změna smyslu proudění v IVS

- Přepážky řešit tak, aby docházelo ke zviření i ve vertikálním směru (**Obr. 105**)
- Umístit do přepážek otvory
- Navrhnout vhodnější vnější hydrodynamický tvar IVS z hlediska snížení potřebných kotevních sil, z hlediska snížení rychlostí proudění uvnitř vzorkovače a z hlediska průtočnosti větších objemů kapaliny.



**Obr. 105** – Návrh úpravy přepážky. Pohled shora

---

## 8. Seznam použitých zdrojů:

[1] ČHMÚ zpráva, *Suspendované sedimenty*, [dokument MS Word, 5 stran], část 1, datum: 27.5.2009

[2] ČHMÚ zpráva, *Suspendované sedimenty*, [dokument MS Word, 4 strany], část 2, datum: 27.5.2009

[3] ČHMÚ zpráva, *Suspendované sedimenty*, [dokument MS Word, 7 stran], část 3, datum: 27.5.2009

[4] ČHMÚ zpráva, *Suspendované sedimenty*, [dokument MS Word, 10 stran], část 4, datum: 27.5.2009

[5] REIDER Mark a kol., *Výskyt a pohyb nebezpečných látek v hydrosféře ČR*, Vav/650/3/00, [pdf dokument, 39 stran], Praha, únor 2003

[6] GRAY John R., *The Liss-SL Streamlined Isokinetic Suspended-Sediment Profiler*, Author: Yogesh Agrawal, [pdf dokument, 8 stran], U.S Geological Survey, Virginia, 2005

[7] RUDOLF Pavel, *Výpočtové modelování jednofázového proudění ve vzorkovači SPM*, Výzkumná zpráva, [dokument MS Word, 25 stran], 2008

[8] *Znečišťování vod*, [on-line], 2009, Obr. 1, poslední revize: 27.5. 2009, dostupné z: <http://ekologie.upol.cz/ku/ahdo/Pollution.pdf>

[9] MILERSKI, *Zápis měření a výpočet zrnitosti hustoměrnou metodou*, [dokument MS Excel], datum: 24.6. 2008

[10] *Thomas Merton's photostream*, [on-line], 2009, Obr. 5, poslední revize: 27.5. 2009, dostupné z: <http://www.flickr.com/photos/thomas-merton/2240107183/>

[11] ČHMÚ, *Oddělení jakosti vody*, [on-line], 2009, poslední revize: 27.5. 2009, dostupné z: <http://www.chmi.cz/BR/oddeleni/jakost.html>

[12] ČHMÚ, *Monitorovací programy*, [on-line], 2009, poslední revize: 27.5. 2009, dostupné z: <http://voda.chmi.cz/ojv2/htm/monprog.htm>

- 
- [13] *SBs Of The ESB*, [pdf dokument, 5 stran], 2009, Obr. 21, datum: 24.11. 2007
- [14] ŠOB František, *Hydromechanika*, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 239 stran, ISBN 80 – 214 – 20037 - 5, Brno 2002
- [15] PERRY Ch., Taylor K., *Environmental sedimentology*, pp. 441, Blackwell Science, Oxford, 2007
- [16] *Turbulent and laminar flow*, [on-line], 2009, Obr. 3, poslední revize: 27.5. 2009, dostupné z:  
[http://boojum.as.arizona.edu/~jill/NS102\\_2006/Lectures/Lecture12/turbulent.html](http://boojum.as.arizona.edu/~jill/NS102_2006/Lectures/Lecture12/turbulent.html)
- [17] MATOUŠEK Václav, *Výtok otvorem – aplikace pro stavidlo a plavební komoru*, [pdf dokument, 60 stran], 2009, poslední revize: 27.5. 2009, dostupné z:  
[http://hydraulika.fsv.cvut.cz/users/matousek/downloads/web\\_HY3V\\_10\\_Vytok\\_otvorem\\_stavidlo\\_a\\_plavebni\\_komora.pdf](http://hydraulika.fsv.cvut.cz/users/matousek/downloads/web_HY3V_10_Vytok_otvorem_stavidlo_a_plavebni_komora.pdf)
- [18] KOZUBKOVÁ Milada, *Numerické modelování proudění FLUENT I*, [pdf dokument, 152 stran] Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení, Ostrava 2008
- [19] Fluent 6.3., *Tutorial Guide*, [pdf dokument, 862 stran], září 2006
- [20] SCHULZE T., Ricking M., Schröter-Kermani Ch., Körner A., Denner H.-D., Weinfurtner K., Winkler A., Pekdeger A. *The German Environmental Specimen Bank Sampling, processing, and archiving sediment and suspended particulate matter. J Soils Sediments* 2.2007
- [21] BROWN A.G., *Alluvial geoarcheology. Floodplain Archeology and environmental change*. Cambridge Manuals in Archeology, Cambridge, 1997
- [22] GRAHAM J., *Collection and analysis of field data*. In: *Techniques in Sedimentology* (ed. Tucker), pp. 5-62. Blackwell Science, Oxford, 1988
- [23] FILIPEK I.H., Nordstrom D.K., Ficklin W.H., *Interaction of acid-mine drainage with waters and sediments of West Squawk Creek in the west Shasta mining district, California*. *Environmental Science and Technology* 21, 388-96, 1987
- [24] KRATZER C.R., *Transport of sediment-bound organochlorine pesticides to the San Joaquin River, California*. *Journal of the American Water Resources Association* 35, 957-81, 1999
-

[25] HELGEN S.O., Moore J.N., *Natural background determination and impact quantification in trace metal contaminated river systems*. Environmental Science and technology 30, 129-35, 1996

[26] Holoubek, I. a kol., *Úvodní národní inventura persistentních organických polutantů v České republice*. Projekt GF/CEH/01/003: ENABLING ACTIVITIES TO FACILITATE EARLY ACTION ON THE IMPLEMENTATION OF THE STOCKHOLM CONVENTION ON PERSISTENT ORGANIC POLLUTANTS (POPs) IN THE CZECH REPUBLIC. TOCOEN, s.r.o., Brno v zastoupení Konsorcia RECETOX - TOCOEN & Associates, TOCOEN REPORT No. 249, Brno, srpen 2003. Dostupné z: <http://www.recetox.muni.cz/>.

## 9. Seznam zkratek

LISST-ST	z angl. Laser In Situ Scattering Transmissometer-StreamLined Přístroj na měření rozptylu částic v proudu kapaliny laserovým paprskem
LDA	z angl. Laser Doppler Anemometry Metoda měření rychlosti proudění laserem založená na Dopplerově jevu
IVS	Integrovaný vzorkovač sedimentu
CFD	z angl. Computational Fluid Dynamics Výpočtové modelování proudění
LES	z angl. Large Eddy Simulation Simulace velkých vírů

## 10. Seznam příloh

Název	Číslo výkresu	Formát	Pozice
doraz_pryžový	0-000-022	A4	21
doraz_zadní	0-000-021	A4	20
doraz	0-000-020	A4	22
komplet	1-000-000	A1	
komplet	1-000-000/K	A4	
komplet	1-000-000/K	A4	
konstrukce	0-005-000	A3	5
kostka	0-000-010	A2	7
kostka_držák	0-000-011	A4	8
krabice	0-001-000	A2	1
krabice_bocni stena	0-001-001	A4	
krabice_celni stena	0-001-002	A3	
krabice_dno	0-001-003	A4	
krabice_prepazka predni	0-001-004	A4	
krabice_prepazka zadní	0-002-005	A4	
krabice_víko s prepážkou	0-002-000	A3	
krabice_víko	0-002-006	A3	2
krabice_zadní stena	0-001-007	A4	
nádrž	0-003-000	A2	3
nadrz_bočnice jednoduchá	0-003-001	A3	
nadrz_bočnice s otvory	0-003-002	A3	
nádrž_čelní stěna	0-003-003	A3	
nádrž_dno	0-003-004	A3	
násypka_patka	0-000-017	A4	19
násypka_závěs	0-000-019	A4	18
přívod	0-000-008	A4	10
rozdělovač_doraz	0-000-004	A4	23
rozdělovač_pouzdro	0-000-018	A4	14
rozdělovač_příruba M6	0-000-009	A4	12
rozdělovač_příruba	0-000-012	A4	11
rozdělovač_rozvodnový	0-000-013	A3	13
tubička	0-004-000	A4	4
vývod	0-000-014	A4	17
vývod_kryt s těsněním	0-000-015	A4	15
vývod_těsnění	0-000-024	A4	16
základová_deska	0-000-016	A4	9